

# **Användning av koldioxid i kylanläggningar**

Alexander

Åkermarck

Examensarbete  
Energi-och miljöteknik  
2018

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Energi-och miljöteknik
Identifikationsnummer:	17450
Författare:	Alexander Åkermarck
Arbetets namn:	Användning av koldioxid i kylanläggningar
Handledare (Arcada):	Mariann Holmberg
Uppdragsgivare:	Arcada
<p>Sammandrag:</p> <p>I examensarbetet granskas egenskaperna hos det naturliga köldmediet koldioxid och vad det innebär när man talar om ett naturligt köldmedium som har en del special-egenskaper i en kylprocess. Examensarbetet är indelat i två delar, en allmän del och en teoretisk jämförelse av fyra köldmedier: propan (R290), isobutan (R600a), ammoniak (R717) och koldioxid (R744). Traditionella köldmedier har länge haft en dominerande plats inom kyltekniken. På grund av förordningar från både EU-kommissionen och Montrealprotokollet, vars uppgift är att stegvis minska och slutligen stoppa användningen av föreningar skadliga för ozonskiktet d.v.s. traditionella köldmedier, har koldioxid därmed blivit ett lockande alternativ inom kylteknikbranschen. Tack vare förordningarna har företag inom kylteknikbranschen börjat planera och optimera kylsystem som fungerar med naturliga köldmedier. Framförallt har företag blivit intresserade av värmeåtervinning vid koldioxidkylprocesser. I examensarbetet tas koldioxidens egenskaper upp, och som läsare kommer man att inse att koldioxid har en del specialegenskaper i en kylprocess. Arbetets målsättning är att läsaren som inte har bred förkunskap inom området skall kunna få en bredare syn på vad det innebär när man talar om köldmedier och specifikt om koldioxid som köldmedium. I arbetets allmänna del förklaras också de olika processer som krävs för kylning med koldioxid. Arbetet berör huvudsakligen livsmedelskyla och industriella applikationer men är också lämpat för andra slags av koldioxidburna kylsystem. Syftet med arbetet var att jämföra de fyra ovannämnda köldmedierna. Som metod för jämförelsedelen skapades en tabell som innehåller de väsentligaste punkterna som anses vara betydande när man jämför köldmedier sinsemellan. Målsättningen med jämförelsedelen var att utreda vilket av de fyra köldmedierna som har de bästa egenskaperna. Svar på denna fråga var svår att fastställa p.g.a. att egenskaperna i ett köldmedium är så varierande. En del egenskaper i ett köldmedium kan vara goda medan andra egenskaper kan vara sämre. Därmed är det alltid en kompromisslösning när man väljer ett köldmedium till en viss kylprocess.</p>	
Nyckelord:	Koldioxid, Köldmedier, Kylprocess, Miljöpåverkan
Sidantal:	54+4
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	25.5.2018

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Energi-och miljöteknik
Identification number:	17450
Author:	Alexander Åkermarck
Title:	Användning av koldioxid i kylanläggningar
Supervisor (Arcada):	Mariann Holmberg
Commissioned by:	Arcada
<p><b>Abstract:</b></p> <p>The thesis deals with the properties of the natural refrigerant carbon dioxide and the impact of carbon dioxide in refrigeration cycles. The thesis is divided into two categories, a general part and a theoretical comparison of four refrigerants: propane (R290), isobutane (R600a), ammonia (R717) and carbon dioxide (R744). Traditional refrigerants have long been dominant in refrigeration technology. Due to regulations of both the EU Commission and the Montreal Protocol which task is to phase out the use of ozone harmful traditional refrigerants, carbon dioxide has become the preferred refrigerant in the refrigeration industry. Thanks to the regulations, companies in the refrigeration industry have begun to plan and optimize refrigeration systems that work with natural refrigerant. Above all, companies have specifically been interested in heat recovery from carbon dioxide refrigeration processes. In the thesis, the properties of carbon dioxide is brought up and as a reader; one will realize that carbon dioxide has some unique properties in refrigeration cycles compared to other traditional refrigerants. The purpose of the work is that readers who have some knowledge of refrigeration technology should be able to get a wide view of refrigerants and specifically about carbon dioxide as a refrigerant. The general part of the thesis also explains the different processes required for cooling with carbon dioxide. The work mainly concerns food retail and industrial applications but is also suitable for other areas of carbon dioxide refrigeration plants. The purpose of the work was to compare four refrigerants (mentioned above). As a method of the comparison, a table was created containing the most important points that are considered significant when comparing refrigerants between themselves. The objective of the comparison was to investigate which of the four refrigerants has the best properties. The answer to this question was difficult to determine because of the properties of a refrigerant are so varied. Some properties in a refrigerant may be good while other properties may be worse. Therefore, it's always some sort of compromise when choosing a refrigerant for a refrigeration processes.</p>	
Keywords:	Carbon dioxide, Refrigerants, Refrigeration cycle, Environmental impact
Number of pages:	54+4
Language:	Swedish
Date of acceptance:	25.5.2018



OPINNÄYTE	
Arcada	
Koulutusohjelma:	Energi-och miljöteknik
Tunnistenumero:	17450
Tekijä:	Alexander Åkermarck
Työn nimi:	Användning av koldioxid i kylanläggningar
Työn ohjaaja (Arcada):	Mariann Holmberg
Toimeksiantaja:	Arcada
<p><b>Tiivistelmä:</b></p> <p>Opinnäytetyössä tarkastellaan luonnonmukaista kylmäainetta hiilidioksidia ja mitä käytännössä tarkoitetaan, kun puhutaan hiilidioksidista kylmälaitteissa. Opinnäytetyö on jaettu kahteen osaan, yleinen osa ja teoreettinen vertailu neljästä kylmäaineesta: propaani (R290), isobutaani (R600a), ammoniakki (R717) ja hiilidioksidi (R744). Perinteiset kylmäaineet ovat pitkään olleet hallitsevia jäähdytysnesteitä kylmäteknikassa. EU-direktiivit sekä Montrealin pöytäkirja, jonka tehtävänä on asteittain vähentää otsonikerrosta heikentäviä perinteisiä kylmäaineita, on hiilidioksidi saanut merkittävän paikan kylmäteknikassa. Näiden määräysten ansiosta, kylmäteknikan yritykset ovat nyt alkaneet suunnitella ja optimoida luonnollisten kylmäaineiden kanssa toimivia jäähdytysjärjestelmiä. Yritykset ovat ennen kaikkea kiinnostuneita lämmön talteenotosta hiilidioksidi toimivista jäähdytyslaitteista. Opinnäytetyössä hiilidioksidin ominaisuudet otetaan esille, jotta lukija ymmärtäisi, että on olemassa joitakin erikoisuuksia, kun hiilidioksidia käytetään kylmälaitteissa. Opinnäytetyön aikomus on, että lukijalla jolla ei ole laajaa tietämystä kylmäteknikasta pystyisi saamaan paremman kuvan mitä tarkoitetaan, kun puhutaan kylmäaineista ja erityisesti hiilidioksidista kylmäaineena. Työ koskee pääasiassa elintarvike- ja teollista jäähdytystä, mutta soveltuu myös muuhun hiilidioksidi toimiviin jäähdytyslaitteisiin. Opinnäytetyön aikomus oli verrata neljä edellä mainittua kylmäainetta. Vertailun menetelmänä luotiin taulukko, joka sisältää tärkeimmät ominaisuudet jota pidetään merkittävänä verrattaessa kylmäaineita keskenään. Vertailun tavoitteena oli selvittää mitkä kylmäaineet sisältävät parhaat ominaisuudet. Vastaus kysymykseen oli vaikea määrittää, koska kylmäaineiden ominaisuudet ovat niin erilaisia. Eräät kylmäaineet voivat sisältää hyviä ominaisuuksia ja eräät voivat sisältää huonoja ominaisuuksia. Näin ollen on aina kyse kompromissista, kun valitaan kylmäaineita jäähdytysprosesseille.</p>	
Avainsanat:	Hiilidioksidi, Kylmäaineet, Kylmäprosessi, Ympäristövaikutus
Sivumäärä:	54+4
Kieli:	Ruotsi
Hyväksymispäivämäärä:	25.5.2018

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>TERMINOLOGI .....</b>	<b>7</b>
<b>FÖRORD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Inledning.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Bakgrund.....</b>	<b>13</b>
<b>3 Allmänt om köldmedier och kylprocesser .....</b>	<b>14</b>
3.1 Fördelning och benämning av köldmedier .....	15
3.2 Numrering av köldmedier .....	18
3.3 Kylprocess.....	20
<b>4 Koldioxid som köldmedium .....</b>	<b>22</b>
4.1 Historia.....	22
4.2 Egenskaper .....	23
4.3 Koldioxidens olika faser .....	23
4.4 Fördelar och nackdelar med koldioxid som köldmedium .....	25
4.5 Beaktandet av vatten i koldioxid kylprocesser.....	27
<b>5. Koldioxid kylprocesser.....</b>	<b>28</b>
5.1 Subkritisk process .....	29
5.2 Transkritisk process .....	30
<b>6. Koldioxid kylsystem .....</b>	<b>32</b>
6.1 Kaskadmaskin .....	33
6.2 Boostermaskin .....	34
<b>7. Återvinning av kondensvärm.....</b>	<b>37</b>
7.1 Allmänt om kondensering.....	37
7.2 Exempel kopplingar av värmeåtervinning från kondensorvärme .....	39
7.3 Värmeåtervinning i koldioxidkylsystem .....	41
<b>8. Montrealprotokollet .....</b>	<b>42</b>
8.1 EU-direktiv .....	45
<b>9. Introduktion till den teoretiska jämförelsen av köldmedier .....</b>	<b>45</b>
9.2 Propan C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (R290) .....	46
9.3 Isobutan C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (R600a).....	47
9.4 Ammoniak NH <sub>3</sub> (R717) .....	47
9.5 Koldioxid CO <sub>2</sub> (R744).....	47

9.6 Jämförelse mellan köldmedier .....	48
10. Slutsats och diskussion .....	52
<i>KÄLLOR</i> .....	53
BILAGOR .....	58

## TERMINOLOGI

**CO<sub>2</sub>:** koldioxid

**Köldmedium:** är ett ämne som används i en kylprocess för att transportera termisk energi av en lägre temperatur till en högre

**CFC:** Chloro-Fluoro-Carbon

**HCFC:** Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon

**HFC:** Hydro-Fluoro-Carbon

**PFC:** Per-Fluoro-Carbon

**HFO:** Hydro-Fluoro-Olefin

**HC:** Hydro-Carbon

**COP/Köldfaktor:** Coefficient of Performance/  $COP = \frac{Q_{in}}{W_{in}}$

**HVAC:** Heating Ventilation Air Conditioning

**Trippelpunkt:** tillstånd där ett ämne befinner sig i tre olika faser samtidigt (fast, gas och vätska)

**Kritisk punkt:** tillstånd för ett ämne där man inte längre kan skilja på vätska och gas

**GWP:** Global Warming Potential

**ODP:** Ozone Depleting Potential

**UNEP:** United Nations Environment Programme

**ppm:** parts per million

**Traditionella köldmedium:** köldmedium som har eller kommer att få användningsförbud

**Syntetiska köldmedier:** syntetiskt framställda köldmedier som kan innehålla miljökadliga substanser

**Kritisk:** tillstånd som köldmedier har då de övergår från en fas till en annan

**Halogener:** sammanfattande namn för fem grundämnen: fluor, klor, brom, jod och astat

**Halogenerade kolväten:** kolväten där en eller flera väteatomer ersatts med halogenatomer

**Kolväten:** kemiska föreningar i vilka endast kol och väte ingår

## Figurförteckning

Figur 1. Den historiska cykeln av köldmedier (Danfoss, 2018).....	12
Figur 2. Ritad kylprocess (Åkermarck, 2018).....	20
Figur 3. Log p, h-diagram för R744 (Danfoss, 2004, s. 11).....	25
Figur 4. Vattenlöslighet i koldioxid (Marketing, 2007, s. 15).....	28
Figur 5. Subkritisk process (Danfoss, 2004, s. 5)      Figur 6. Transkritisk process (Danfoss, 2004, s. 5) .....	29
Figur 7. Subkritisk process (Danfoss, 2009) .....	30
Figur 8. Transkritisk process (Danfoss, 2009) .....	31
Figur 9. Kaskadmaskin. (Kaappola, 2012).....	33
Figur 10. Boostermaskin. (Kaappola, 2012) .....	33
Figur 11. Transkritisk boostersystem med gas bypass (Danfoss, 2010, s. 2).....	36
Figur 12. Subkritisk kylprocess med ritad kondensering (SWEP) .....	38
Figur 13. Värmeöverföring med flytande kondensering (Sawalha & Chen, 2010, s. 13) .....	39
Figur 14. Värmeöverföring kopplat till ett HVAC system (Sawalha & Chen, 2010, s. 14) .....	40
Figur 15. Värmeöverföring ur en de-superheater (Sawalha & Chen, 2010, s 14).....	41
Figur 16. Transkritisk kylprocess, området i processen där gaskylning sker är markerat med rött (SWEP).....	42
Figur 17. Ozonhål (färgat lila) över Antarktis den 24 september 2006 (SPL, 2013) .....	45



## Tabellförteckning

Tabell 1. Koncentration av koldioxid i % (Marketing, 2007).....	26
Tabell 2. Koncentration av gaser i atmosfären (Laitos, 2017) .....	49
Tabell 3. Jämförelsetabell av köldmedier (Calm, 1999).....	50

## Bilagor

Bilaga 1. Log p, h-diagram för R290 (ASHRAE, 2009) .....	58
Bilaga 2. Log p, h-diagram för R600a (ASHRAE, 2009).....	59
Bilaga 3. Log p, h-diagram för R717 (ASHRAE, 2009) .....	60
Bilaga 4. Log p, h-diagram för R744 (ASHRAE, 2009) .....	61

## FÖRORD

Detta examensarbete har varit ett lärorikt arbete och öppnat nya tankesätt inom kylteknik, köldmedier och deras miljöpåverkan. Arbetets avsikt är att fungera som ett hjälpmedel för personer som är intresserade av kylteknik och utveckling av kylanläggningar som fungerar med koldioxid som köldmedium. Läsaren av detta examensarbete behöver inte ha en bred förkunskap inom området.

Intresset för kylteknik började år 2014 då jag arbetade i företaget Viessmann refrigeration. Tack vare mitt intresse inom tekniken ledde det till att jag år 2014 började studera energi-och miljöteknik vid yrkeshögskolan Arcada. Därmed var valet att skriva mitt examensarbete om *Användning av koldioxid i kylanläggningar* naturligt för mig. Examensarbetet har medfört flera arbetstimmar och mycket nya lärdomar. Ämnet koldioxid i kylanläggningar gav mig en bred blick på vad det innebär när man talar om ett naturligt köldmedium som har en del specialegenskaper i en kylprocess.

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare, lektor Mariann Holmberg som hjälpt och stött mig genom hela min skrivprocess. Tack vare Mariann Holmbergs breda kunskap inom kemi och våra så gott som veckovis hållna möten höll mig fokuserad på arbetet. Jag vill också rikta ett stort tack till min inspirationskälla och nära arbetskamrat vid Viessmann refrigeration Lars-Erik Sundsten. Tack vare Lars-Erik Sundstens breda kunskap inom kylteknik och intresse att diskutera tekniken med mig gav mig inspiration att studera inom området. Slutligen vill jag tacka min syster Sofia Åkermarck, vars kunskap inom akademiskt skrivande hjälpt mig att få arbetet i ett professionellt skick.

Helsingfors 25.5.2018

.....

Alexander Åkermarck

# 1 INLEDNING

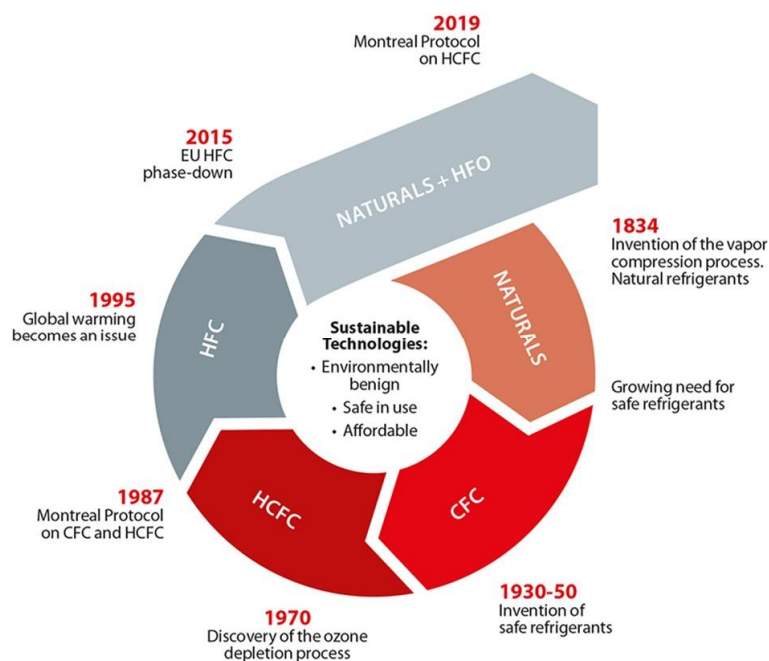
I detta examensarbetet granskas egenskaperna hos det naturliga köldmediet koldioxid ( $\text{CO}_2$ ). Arbetet består av en teoretisk jämförelse mellan traditionella köldmedier och koldioxid. Samhället vi lever i nu är det viktigt att tänka på vad och vilka föroreningar vi släpper ut i atmosfären. En stor negativ inverkan på vårt klimat beror på utsläpp av ozonskadliga CFC (klorfluorkarboner) och HCFC (hydrofluorkarboner) kemikalier som innehåller bl.a. klor och fluor. Utsläpp av dessa skadliga kemikalier är allmänna i äldre kylanläggningar som ännu använder sig av dessa kemikalier. Eftersom koldioxid är en naturlig substans har den inte någon negativ inverkan på vårt klimat och har därför blivit det prefererade köldmediet inom kylteknik branschen. Det att koldioxid har blivit allmänt inom kyltekniken har till stor del att göra med Montrealprotokollet och EU:s direktiv, vars uppgift är att stegvis minska och slutligen stoppa användningen av dessa ozonskadliga substanser.

Montrealprotokollet godkändes år 1987 och trädde i kraft år 1989. Protokollets huvudsyfte är att stegvis minska och slutligen stoppa produktionen och användningen av ozonskadliga CFC och HCFC kemikalier. I och med deras fysikaliska egenskaper har CFC och HCFC kemikalier haft en stor framgång inom kylteknikbranschen men också inom andra kemiska tillämpningar. Problemet med dessa kemikalier är att de bryter ner ozonskiktet i atmosfären vilket leder till att "ozonhål" skapas. Forskning i början av 1980-talet visade att klor i CFC och HCFC föreningar fungerade som ett påskyndande medel i förstörelsen av ozonskiktet. Med GWP eller Global Warming Potential indexet mäter man hur kemiska och naturliga substanser inverkar på den globala uppvärmningen. För koldioxid är GWP värdet 1. För CFC och HCFC kemikalier är GWP värdet mycket högre (kan vara upp till 4000). ODP talet (Ozone Depletion Potential) beskriver köldmediernas relativa ozon skadlighet. För koldioxid är värdet 0. Numera får man inte installera nya kylsystem som har ett ODP värde högre än 0.

Ozon ( $\text{O}_3$ ) finns i atmosfären vid en höjd på 20–30 km och spelar en viktig roll i vår tillvaro på jorden. Ozon uppstår när en syremolekyl i atmosfären (två syreatomer som är bundna till varandra) splittras av solens UV-strålning. Av de ensamma syreatomerna

förenas de igen ihop med tre syreatomer och påföljden av detta bildas det ozon. Detta sker konstant i atmosfären och det bildas också syre där. På grund av att CFC och HCFC kemikalier innehåller klor som reagerar kraftigt med ozon, gör det att ozonskiktet sönderfaller snabbare än vad det hinner producera. Problemet med att ozonskiktet sönderfaller, är att den starka UV strålningen penetrerar igenom ozonhålen och skadar växtligheter, djur och människor på jorden. Ozonskiktet är som tunnast över Antarktis där ”ozonhål” uppstår på våren då solen sätter fart på ozonnedbrytning med hjälp av klor som frigjorts av CFC och HCFC kemikalier.

CFC föreningar har sedan 1995 fått användningsförbud. Från och med 2030 får det inte förekomma HCFC kemikalier. Därmed har koldioxid blivit ett lockande alternativ inom kyltekniken. Detta har lett till att företag inom kylteknik branschen nu börjat planera och optimera koldioxid baserade kylsystem. I synnerhet har man fokuserat på återvinning av värmen från transkritiska koldioxidprocesser för att värmen vid gaskylningen är mycket högre än vad den är vid traditionella kylsystem. Eftersom koldioxid är en miljövänlig substans och då dess fysikaliska egenskaper lämpar sig bra inom kyltekniken, gör det att koldioxid nu kommer starkt tillbaka in på marknaden. Figur 1 nedan förklarar den historiska cykeln av köldmedier (Dr Pearson, 2014, s. 12-15).



Figur 1. Den historiska cykeln av köldmedier (Danfoss, 2018)

## 2 BAKGRUND

Arbetets syfte var att undersöka och jämföra det naturliga köldmediet koldioxid med traditionella köldmedier. I arbetet beskrivs de olika processerna som krävs för att skapa kyla med koldioxid. Arbetet berör huvudsakligen livsmedels-och industriella kylanläggningar men är också lämpat för andra slag av koldioxidkylanläggningar. Arbetet är uppdelat i två kategorier, en allmän del där det redogörs om koldioxid som köldmedium och en jämförelsedel. Jämförelsedelen går ut på att ur en tabell jämföra olika köldmedier som nu och i framtiden kommer att spela en viktig roll inom kyltekniken. Tabellen är i sig själv kortfattad men innehåller de väsentliga punkter som anses vara nödvändiga när man jämför köldmedier sinsemellan.

När man talar om koldioxid och i synnerhet om koldioxidutsläpp, väcker det i allmänhet tankar och frågor om den globala uppvärmningen och växthuseffekten. För människor kan det väcka tankar om att: ”varför installera nya kyltrustningar som använder köldmediet koldioxid när det globala målet är att minska på koldioxidutsläpp”. Svar på frågan gavs av Professor, Jouni Räisänen som arbetar vid det meteorologiska institutet i Helsingfors universitet. Jouni Räisänen svarade på följande sätt: ”Utsläpp av koldioxid till atmosfären ur kyltrustningar är ett obetydligt problem. Utsläpp av koldioxid i atmosfären är mycket lågt jämfört med andra utsläpp. Koldioxid är en ineffektiv växthusgas jämfört med tidigare använda föreningar som t.ex. CFC föreningar” (Räisänen, 2018).

### **Uppgift:**

Jämförelse av fyra olika köldmedier baserad på en litteraturundersökning med beaktande av deras lämplighet som köldmedier beträffande säkerhet, miljövänlighet samt fysikaliska och kemiska egenskaper, som anses ha betydelse vid deras användning i en kylprocess.

### 3 ALLMÄNT OM KÖLDMEDIER OCH KYLPROCESSER

Köldmedier är kondenserade gaser som används som värmeöverföringsmedel i kylmaskiner. Användningen av köldmedium i en kylmaskin baserar sig på kylmedlets förmåga att övergå från en fas till en annan (från vätska till gas). Detta sker genom att ta emot värme från det kylda utrymmet, som man önskar hålla vid lägre temperatur än omgivningen (förångning). Köldmediernas egenskaper i en kylprocess är i hög grad beroende på tryck och temperatur. Från de termodynamiska och kemiska egenskaperna bör ett bra köldmedium bl.a. ha:

- **Hög förångningstemperatur**
  - + resulterar till ett mindre massflöde och därmed kan mindre rör användas
- **Låg viskositet**
  - + tryckförluster i rör och ventiler är låga
- **Stabilt**
  - + högt drifttemperaturområde som möjliggör olika temperaturnivåer vid kylning
- **Obrännbart**
  - + för säker användning
- **Giftfritt**
  - + för säker användning

Förutom de egenskaper som nämnts ovan bör också köldmedier vara billiga och miljövänliga. Eftersom att köldmedier bör ha flera goda egenskaper är det förståeligt att inte ett köldmedium kan innehålla alla dessa egenskaper. Därför är valet av köldmedier för olika tillämpningar alltid en form av kompromiss. Köldmedier delas allmänt upp i tre olika kategorier, beroende på om det är frågan om ett en-komponents köldmedium eller köldmediumblandningar (Kaappola, et al., 2015, s. 31-36).

Dessa tre grupper är:

**En-komponents köldmedium:**

Består av endast ett köldmedium vars förångning och kondensation sker vid en konstant temperatur.

**Azeotropiska köldmedium:**

Två eller flera en-komponents köldmedium, vars förångning och kondensation sker vid en konstant temperatur. Köldmediets beteckning börjar med nummer 5, t.ex. R507A.

**Zeotropiska köldmedium:**

Två eller flera en-komponents köldmedium, som i samband med förångning och kondensation åstadkommer en temperaturförändring. Köldmediets beteckning börjar med nummer 4, t.ex. R404A.

Huvudsakligen är köldmedier uppbyggda av organiska kolväten där väteatomer på olika sätt är bearbetade och ersatta av halogenatomer. Med halogenerade molekyler menar man föreningar som innehåller fluor-(**F**), klor-(**Cl**), brom-(**Br**) eller jodatomer-(**I**). Således har man fått ett stort antal så kallade halogenerade kolväten (Kaappola, et al., 2015, pp. 31-40) (Kaappola, et al., 2015, pp. 31-36).

### **3.1 Fördelning och benämning av köldmedier**

Klassificering och beteckning av köldmedier enligt kemisk uppbyggnad gör det lättare att skilja på köldmedier och underlättar att förstå skillnaden i deras kemiska uppbyggnad. Namngivningen av köldmedier baserar sig på en bokstavskod och den efterföljande nummerdelen.

Bokstaven **R** som betecknar att det är frågan om ett köldmedium, kommer från det engelska ordet *refrigerant*. De officiella beteckningarna beviljas av den amerikanska intressegruppen ASHRAE (American Society of Heating, Ventilation and Refrigerating Engineers). Som ovan nämnts är köldmedium i allmänhet kolväten. Enligt lagstiftningen

delar man upp just dessa köldmedier på basis av deras halogenerade molekyler. Halogenerade kolväten delas upp i följande grupper:

#### **CFC-köldmedier:**

Chloro-Fluoro-Carbon är helt och hållet halogenerade kolväten, som innehåller klor, kol och fluor men inte väte. Dessa köldmedier är ozon och växthusskadliga föreningar och har därmed fått användningsförbud sedan 1995. Några vanliga CFC-köldmedier är R12 och R502.

#### **HCFC-köldmedier:**

Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon är delvis halogenerade kolväten, som innehåller fluor, kol och väte. De är inte så skadliga för ozonskiktet men mycket skadliga för växthuseffekten. Några vanliga HCFC-köldmedier är R401, R402, R403, R408 och R409.

#### **HFC-köldmedier:**

Hydro-Fluoro-Carbon är också delvis halogenerade kolväten, som innehåller fluor, kol och väte. De är inte heller så skadliga för ozonskiktet men är mycket skadliga för växthuseffekten. Några vanliga HFC-köldmedier är R134a, R404A och R407C.

#### **PFC-köldmedier:**

Per-Fluoro-Carbon är fullständigt halogenerade kolväten som enbart innehåller fluor och kol. Dessa substanser är inte skadliga för ozonskiktet, men är mycket skadliga för växthuseffekten. Några vanliga PFC-köldmedier är R14 och R116.

#### **HFO-köldmedier:**

Hydro-Fluoro-Olefin är delvis halogenerade kolväten, som innehåller fluor, kol och väte. Dessa köldmedier är varken skadliga för ozonskiktet eller växthuseffekten. Några vanliga HFO-köldmedier är R1234ze och R1234yf.

Inom dessa köldmedium kategorier är alla substanser så gott som förbjudna eller kommer att bli förbjudna inom kyltekniken. HFC, PFC och HFO köldmedier kallas också för f-gaser. Med f-gaser menar man substanser som innehåller fluor. Av dessa f-gaser är HFO gruppen den enda som inte ännu blivit reglerad av förordningar. Skillnaden mellan



HFO och HFC köldmedier är i deras molekylstruktur. I HFO-ämnen finns det en dubbelbindning mellan de båda kolatomerna, då det i HFC-ämnen enbart finns en enkelbindning mellan kolatomerna (Kaappola, et al., 2015, pp. 31-36).

Av de ovannämnda grupperna finns det två grupper som inte innehåller halogenerade molekyler eller fluoratomer. Dessa köldmedier är naturliga kemikalier och är bl.a. rena kolväten, ammoniak och koldioxid. Naturliga köldmedier finns i naturen som sådana, och är därmed varken skadliga för ozonskiktet eller för växthuseffekten. Naturliga köldmedier delas upp i följande två kategorier:

#### **HC-köldmedier:**

Hydro-Carbon är rena kolväten. Till den här gruppen hör bl.a. propan (R290) och isobutan (R600a). Dessa substanser är icke skadliga för ozonskiktet och deras betydelse för växthuseffekten är mycket litet.

#### **Oorganiska köldmedier:**

Inorganic Compounds är rena oorganiska föreningar. Vanliga köldmedier inom den här kategorin är ammoniak (R717) och koldioxid (R744). Dessa substanser är icke ozon-skadliga och deras växthuseffekt är mellan 0 och 1.

Som redan nämnts är köldmedier uppdelade i olika kategorier. Av dessa kategorier bestämmer ASHRAE vilken numrering köldmedier får. Inom azeotropiska blandningar har ASHRAE bestämt att numret 500 står för azeotropiska köldmedier. Detta betyder att alla azeotropiska köldmedier namnges med numret R500 framåt. För oorganiska föreningar har ASHRAE utsett numret 700. De två siffrorna efter 7 för oorganiska köldmedier anger molekylvikten för föreningen, d.v.s. för koldioxid som har en molekylvikt på 44 g/mol blir koldioxidens kylnummer R744 (Kaappola, et al., 2015, s. 31-40).

## 3.2 Numrering av köldmedier

Numreringen av köldmedier ges av ASHRAE. Numreringen sker via matematiska beräkningar som är olika för köldmediernas grupper.

Av en-komponents kolväten eller HC-köldmedium beräknar man deras kemiska formel på följande sätt, Formel 3.1:



**m**= antal av kolatomer (st)

ex: isobutan  $\text{C}_4\text{H}_{10}$

När kolväte processas och väteatomerna ersätts av halogenmolekyler, får man halogenkolväten.  $\text{HC}_{\text{hal}}$  kemiska formel definieras på följande sätt:

Formel 3.2:



**m**= antal av kolatomer (st)

**n**= antal av väteatomer (st)

**p**= antal av fluor atomer (st)

**q**= antal av kloratomer (st)

**r**= antal av bromatomer (st)

**s**= antal av jodatomer (st)

Formel 1.1 är modifierad på följande sätt så att numreringen av kolväten och halogenkolväten kan beräknas när man vet dess kemiska uppbyggnad. Modifierad Formel 3.3:

$$\mathbf{R(x) (m-1) (n+1) (p) B(r) I(s)}$$

ex: Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  (R290)

$R = (0) (3-1) (8+1) (0) (0) (0)$

$R=290$

**(x)** = omäktade kolbindningar i en förening (kolväten som innehåller dubbel eller trippelbindningar). Om talet är 0, räknar man inte med det i numreringen. I praktiken är det enbart eten-gruppen som innehåller omäktade kolbindningar.

**(m-1)** = antal kolatomer i en förening minus 1. Om talet är 0, räknar man inte med det i numreringen.

**(n+1)** = antal väteatomer i en förening plus 1. Talet nämns alltid i numreringen.

**(p)** = antal fluoratomer i en förening. Talet nämns alltid i numreringen.

**B(r)** = i föreningar som innehåller brom tillsätter man alltid bokstaven B i slutet av numreringen. Efter bokstaven B tillsätter man alltid antalet bromatomer i en förening. Om talet är 0 lämnar man bort termen B(r) i numreringen. Köldmedium som innehåller brom hör till CFC-kategorin och är därmed förbjudna substanser.

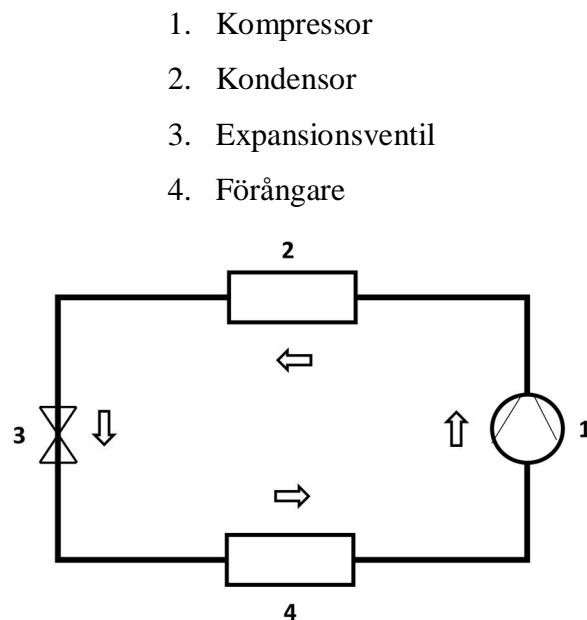
**I(s)** = föreningar som innehåller jod tillsätter man alltid bokstaven I efter numreringen. Efter bokstaven (I) tillsätter man alltid antalet jod atomer som finns i föreningen. Om talet är 0, lämnar man bort termen I(s) i numreringen. Kommersiella köldmedier innehåller inte jod.

Kloratomer (Cl) betecknas inte i numreringen p.g.a. att de är i resten av föreningens atomer:  $2m+2-(p+q+r+s)$ . För etanköldmedier som har mera en två kolatomer, kan atomernas placering i föreningen variera även om föreningen är oförändrad. Dessa s.k. monomer separeras från varandra med små bokstäver efter numreringen med a,b eller c. Den symmetriska monomen får inte någon bokstav efter sig medan de nästa symmetriska köldmedier får bokstaven a,b eller c, t.ex. R600 och R600a, (butan och isobutan).

För azeo-och zeotropiska köldmedier sker numreringen med basis på vilka subköldmedier som förekommer i föreningen. Av dessa subköldmedier ges nummerordningen med basis på substansernas kokpunkt som finns i föreningen. Kylmedlet R407A som innehåller en blandning av (R32/R125/R134a) och med en mängd (20/40/40 %) fås då numreringen av dessa substansers kokpunkt: R32: -57.7, R125: -48.1 och R134a: -26.1 □ (Kaappola, et al., 2015, s. 36-39).

### 3.3 Kylprocess

Principen i en kylprocess går ut på att förflytta termisk energi av en lägre temperatur till en högre temperatur. För att detta skall ske använder man köldmedium i en kylprocess som binder värme från den lägre temperaturen och avger det i en högre. Termodynamikens andra huvudsats säger att värme alltid naturligt förflyttar sig från en högre temperatur till en lägre. För att detta skall ske tvärtom, bör man alltid tillföra arbete. I en kylprocess ges arbete vanligtvis ur en eller flera kompressorer. En kylprocess består av fyra grundläggande komponenter (Cengel & Boles, 2011, pp. 611-612), (Kaappola, et al., 2015, s. 17-18).



Figur 2. Ritad kylprocess (Åkermarck, 2018)

I en ideal kylprocess (Figur 2 ovan) sugs köldmediet in i kompressor (1) som mättad ånga och pressas till ett högre tryck. Under kompressionen stiger trycket och temperaturen i köldmediet. Efter kompressionen förflyttar sig köldmediet (som är i ett tillstånd som överhettad ånga) till kondensorn (2) där köldmediet kondenseras och avger värme till omgivningen. Därmed ändrar köldmediet fas från överhettad ånga till mättad vätska. Därefter förflyttar sig köldmediet (som nu är i vätskeform) till en expansionsventil (3). Vid expansionsventilen sjunker trycket och temperaturen i köldmediet. Efter expansionsventilen förflyttar sig köldmediet till förångaren (4) där köldmediet förångas och bin-

der till sig värme av kylrummet. Köldmediets tillstånd i förångaren är en mättad blandning med låg andel ånga. Härfter börjar hela kylprocessen om på nytt. När man talar om en ideal kylprocess syftar man på en process som teoretiskt fungerar utan förluster. I en typisk kylprocess sker det alltid små tryck-och värmeförluster. (Cengel & Boles, 2011, s. 611-612).

Energin som matas in i kompressorn (el) och värmen som bortföres från kylrummet avges ut ur kondensorn. Processen går att skriva ut i en matematisk formel på följande sätt, Formel 3.4:

$$W_{in} + Q_{in} = Q_{out}$$

$W_{in}$ = Arbete (el) som matas in i kompressorn (Watt)

$Q_{in}$ = Värmeenergin som förångaren binder till sig

$Q_{out}$ = Den bundna värmen av förångaren och kompressorn som avges till omgivningen

Köldfaktorn eller COP-värdet (*coefficient of performance*) använder man för att beskriva hur effektiv en kyl och värmeprocess är. För en kylprocess går verkningsgraden att räkna ut på följande sätt, Formel 3.5:

$$COP = \frac{Q_{in}}{W_{in}}$$

## 4 KOLDIOXID SOM KÖLDMEDIUM

I kapitlet koldioxid som köldmedium introduceras köldmediet koldioxid. I kapitlet kommer koldioxidens historia, egenskaper, olika faser, fördelar, nackdelar och beaktandet av koldioxid i kylprocesser att tas upp.

### 4.1 Historia

Olika kylsystem har använts sedan 1700-talet. Koldioxid eller CO<sub>2</sub> är ett gammalt köldmedium som allmänt användes i början av 1900-talet, men minskade då de syntetiska köldmedierna introducerades på marknaden som t.ex. R12, R502 och R22. Dessa köldmedier har dock en negativ inverkan på vårt ozonskikt och är även växthusgaser som har eller kommer att få användningsförbud.

När man talar om koldioxid som köldmedium refererar man det till dess köldmediumnummer som är R744. Franz Windhausen från Brunswick Tyskland 1886 patenterade den första kylkompressorn som enbart använde sig av koldioxid. Följande år köpte det brittiska företaget J&E Hall licens av Windhausen för att själv tillverka kompressorer som var kapabla för koldioxid. J&E Hall tillverkade också de första två-stegs koldioxidkapabla kompressorerna. Detta kan betraktas som en utgångspunkt till användning av koldioxid inom mekanisk kylning. Anledningen till koldioxidens snabba nedgång på 1900-talet låg i den låga köldfaktorn, och att fysikaliskt bättre men också mycket skadligare köldmedium introducerades till marknaden (Bodinus, 1999, s. 1-2).

I början av 2000-talet återvände koldioxiden tillbaka till marknaden. Det var inte bara de kemiskt goda egenskaperna som gjorde att koldioxid på nytt introducerades, utan också press från beslutsfattaren av både EU-kommissionen och hänsyn till Montrealprotokollet (Johnson, 2014, s. 1).

## 4.2 Egenskaper

Koldioxid har så gott som samma egenskaper som alla andra konventionella köldmedier. Största skillnaden ligger i köldmediets höga arbetstryck som krävs för att skapa kyla. Koldioxid är vid normala temperaturer (0-30°C) och atmosfärtryck en gas. Koldioxid kan även förekomma i fast form (torr is). Detta kan leda till problem i kylanläggningar p.g.a att den fasta formen kan blockera köldmediumflödet i kylprocesser. (Bodinus, 1999).

Koldioxid produceras som en restprodukt vid all förbränning av fossila bränslen som kol, olja och vid nedbrytning av organiska material. Koldioxid är också inert med andra kemikalier. Fastän koldioxid behöver noggrann planering och hållbara komponenter är det ändå det köldmediet som företag inom kylteknik nu satsar på. Den främsta egenskapen ligger i dess miljövänlighet och i det låga GWP värdet som är 1 (Ab, s. 1).

## 4.3 Koldioxidens olika faser

För att förstå principen för de olika tillstånd som köldmedium förekommer i under en kylprocess använder man sig av log  $p$ ,  $h$ -diagram. I ett log  $p$ ,  $h$ -diagram kan man se alla tillståndsvariationer inom ett köldmedium. Därmed är ett log  $p$ ,  $h$ -diagram alltid olika beroende på vilket köldmedium som används. På den horisontala x-axeln avbildas entalpin  $h$  och på den vertikala y-axeln beskrivs trycket  $p$  som uttrycks i en logaritmisk skala. Diagrammet innehåller färgade linjer som beskriver bl.a. temperatur, entropi och specifik volym. Dessa färgade linjer är:

- Röd: Temperatur [°C]
- Blå: Entropi [J/K] mått på ett systems värme per grad Kelvin som är tillgänglig för arbete
- Grön: Specifik volym [m<sup>3</sup>/kg] beskriver hur stor volym en viss massa har

Grafen är uppdelad i svarta linjer beroende på de olika tillstånd som köldmedier förekommer i. Vid den vänstra sidan av diagrammet är köldmediets tillstånd i vätskeform och vid den högra sidan av diagrammet är köldmediets tillstånd i gasform. Under den

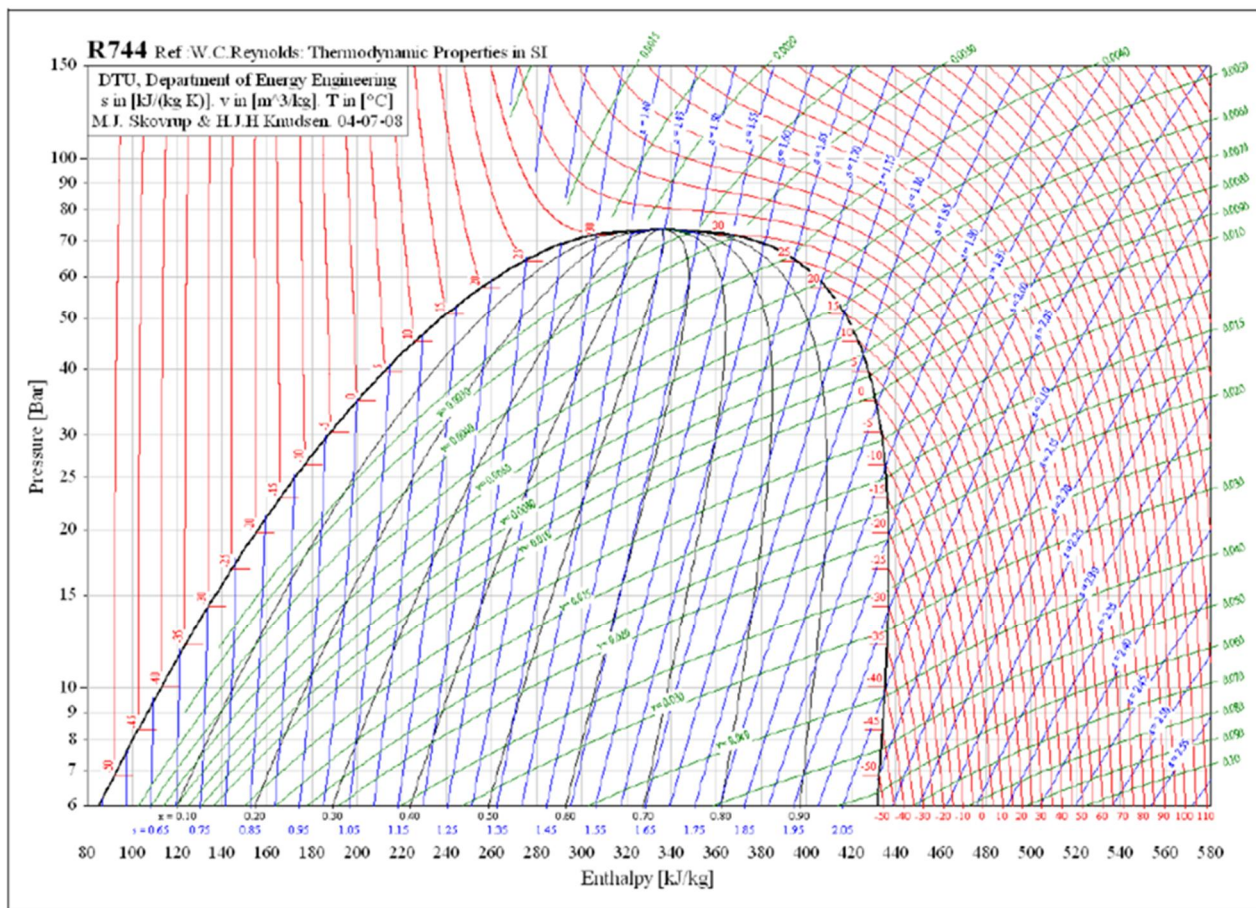
svarta kurvan är köldmediets tillstånd som en mättad blandning av vätska och gas. Vid den högsta punkten i kurvan förekommer den kritiska punkten och går man över den punkten kallas området för ett transkritiskt område (Kleijn, s. 1).

Vid log  $p$ ,  $h$ -diagrammet för R744 (Figur 3 nedan) kan man se en del specialegenskaper för koldioxid, men i allmänhet är diagrammet så gott som lika för andra köldmedier. Normalt börjar log  $p$ ,  $h$ -diagrammet för koldioxid vid 6 bar. Eftersom koldioxid inte förekommer under 5,2 bar i vätskeform är den därmed inte användbar inom kylprocesser. Förutom den höga tryckskalan vid log  $p$ ,  $h$ -diagrammet kan man se att koldioxid vid lägre förångningstemperaturer har en bättre kylförmåga än vad konventionella köldmedier har (Danfoss, 2004, s. 3-5).

De två viktiga punkterna för koldioxid i log  $p$ ,  $h$ -diagrammet är trippelpunkten och den kritiska punkten. Trippelpunkten förekommer då koldioxid har ett tryck på 5,2 bar och en temperatur på  $-56,6\text{ °C}$ . Vid denna punkt kan koldioxid förekomma samtidigt i fast, gas och vätskeform. Det är viktigt att inse att en koldioxidkylprocess alltid måste röra sig över trippelpunkten. I fall processen skulle röra sig vid trippelpunkten är risken stor att processen blir blockerad av köldmediets fasta form (torr is). Vid den kritiska punkten, då koldioxid har ett tryck på 73,8 bar och en temperatur på  $31\text{ °C}$  kan koldioxid förekomma i både vätske- och gasform. Ifall man vid den kritiska punkten ökar på trycket minimalt kan man inte längre skilja på de två faserna. Temperatur och tryck som överskrider den kritiska punkten kallas för ett transkritiskt område. Ovanför den kritiska punkten byter köldmediet fas till ett superkritiskt tillstånd (Danfoss, 2004, s. 3-5).

Jämfört med traditionella köldmedium har koldioxid en väldigt låg kritisk punkt. Detta betyder att i en subkritisk process (där processen sker under den kritiska punkten) kan värmeöverföringen ur en kondensor enbart ske vid en temperatur på  $31\text{ °C}$ . Detta är en temperatur som är mycket lägre än vad den nödvändiga temperaturen är för att avge värme till omgivningen (Danfoss, 2004, s. 3-5).





Figur 3. Log  $p$ ,  $h$ -diagram för R744 (Danfoss, 2004, s. 11)

#### 4.4 Fördelar och nackdelar med koldioxid som köldmedium

Numera strävar man efter att hitta så miljövänliga men också så effektiva köldmedium som möjligt. På grund av att koldioxid har ett GWP värde på 1, betyder det att koldioxid automatiskt är det miljövänligaste köldmediet som finns på marknaden (Marketing, 2007, s. 9-10).

Koldioxid har många andra fördelar jämfört med traditionella köldmedier. En annan fördel med koldioxid är att det är giftfritt, som är en stor fördel speciellt i livsmedelsaffärer där man använder sig av koldioxidkylutrustningar. Jämfört med en stor del andra köldmedium är koldioxid icke brandfarligt. Tvärtom har koldioxid en förmåga att släcka

bränder. Tack vare koldioxidens låga viskositet betyder det att pumpkostnaderna i kylprocesserna är lägre än med traditionella köldmedium (Marketing, 2007, s. 9-10).

Då det gäller till att skapa kyla har koldioxid många fördelar, men det finns också en del nackdelar. Största nackdelen ligger i det höga arbetstryck som krävs för att bilda kyla med koldioxid. Koldioxid är också en färglös och luktfri substans som gör att man inte reagera på den om det sker ett läckage i en koldioxid kylprocess. Därför bör man alltid installera läckage detektorer eller nödventilation vid koldioxidanläggningar. Koldioxid är också tyngre än luft. Detta kan leda till farliga situationer, speciellt om det i omgivningen förekommer gropar eller begränsade utrymmen för koldioxid att försvinna i (Marketing, 2007, s. 9-10).

Koldioxid är närvarande i atmosfären på en halt av ca 0,04 %. I fall detta värde stiger till 2 % har det direkt en negativ inverkan på vårt sätt att leva. Nedan finns en tabell (Tabell 1) på hur mycket koldioxid i % som det krävs för att göra skada till människor:

*Tabell 1. Koncentration av koldioxid i % (Marketing, 2007).*

<b><u>Koldioxid halt i luften %</u></b>	<b><u>Ökning av andningshastighet i %</u></b>
2	50 ökning av andningshastighet
3	100 ökning av andningshastighet
5	300 ökning av andningshastighet
30>	Leder till död

Koldioxid är i många avseenden ett väldigt okomplicerat köldmedium, särskilt vid låga temperaturer. Det är viktigt att inse att koldioxid har vissa unika egenskaper jämfört med traditionella köldmedium. På grund av att koldioxid har en låg kritisk punkt, gör det att man inte direkt kan jämföra koldioxid med t.ex. ammoniak (NH<sub>3</sub>) (Marketing, 2007, s. 9-10).

## 4.5 Beaktandet av vatten i koldioxid kylprocesser

I ett koldioxidkylsystem är den acceptabla vattennivån ( $\text{H}_2\text{O}$ ) mycket lägre än vad den är vid traditionella kylsystem. Vatten kan förorena ett koldioxidkylsystem på fem olika sätt:

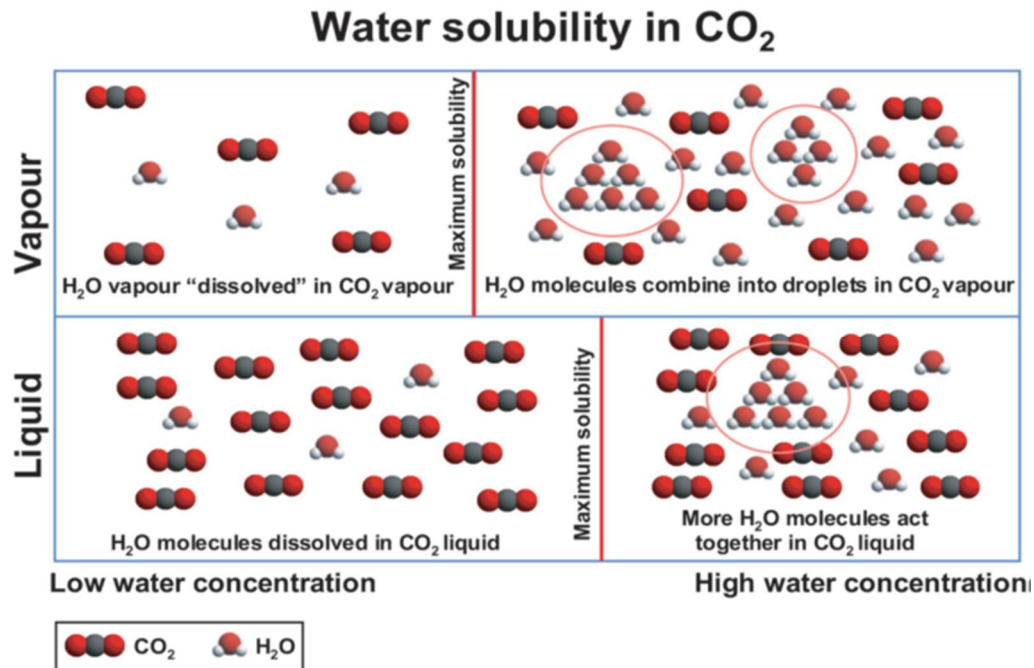
1. Diffusion (när koldioxid och vatten blandar sig med varandra)
2. Vid underhåll och reparation
3. Ofullständig vattenavlägsnande vid installation (idrifttagning)
4. Om smörjmedel som är förorenat med vatten laddas in i systemet
5. Vattenförorenad koldioxid laddas in i systemet

Före laddning av köldmedium i ett kylsystem laddar man kväve ( $\text{N}_2$ ) i processen. Kvävet uppgift är att från kylanläggningen få ut syre som innehåller vattenmolekyler och också hitta möjliga läckage i systemet. Efter laddningen av kväve suger man vacuum i hela kylsystemet och då minimeras vattenhalten i processen (Dr Pearson, 2014, s. 35).

Om vatten förekommer i ett koldioxidkylsystem kan detta bilda kolsyra ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Kolsyra kan vara korrosivt för vissa metaller. Små mängder vatten kan lätt bli upplöst i koldioxid, men om mängden vatten når mättnad och därmed frigör  $\text{H}^+$  joner är lösningen korrosiv och en form av slam kan förekomma i systemet. Ett annat problem som kan uppstå när vatten befinner sig i ett kylsystem är att det kan frysa till fast form och därmed blockera hela kylprocessen. För att få bort vatten i traditionella kylsystem använder man sig av Zeolit ”torkare”, vars uppgift är att samla upp vattenmolekyler. På grund av att koldioxidmolekyler är så likartade som vattenmolekyler är borttagningen av vatten annorlunda. För att få bort vatten i ett koldioxidkylsystem använder man sig av filter torkaren. Det mest effektiva sättet att upptäcka och avlägsna vatten i ett koldioxidkylsystem är då när köldmediet är i vätskeform och framförallt före expansionsventilen (Dr Pearson, 2014, p. 35).

Figur 4. Vattenlöslighet i koldioxid Figur 4 nedan visar hur vatten skapar problem i ett koldioxidkylsystem. Från figuren ser man att små mängder vatten inte skapar stora problem i ett koldioxidkylsystem. Vattenmolekyler binder sig snabbt till varandra, och som

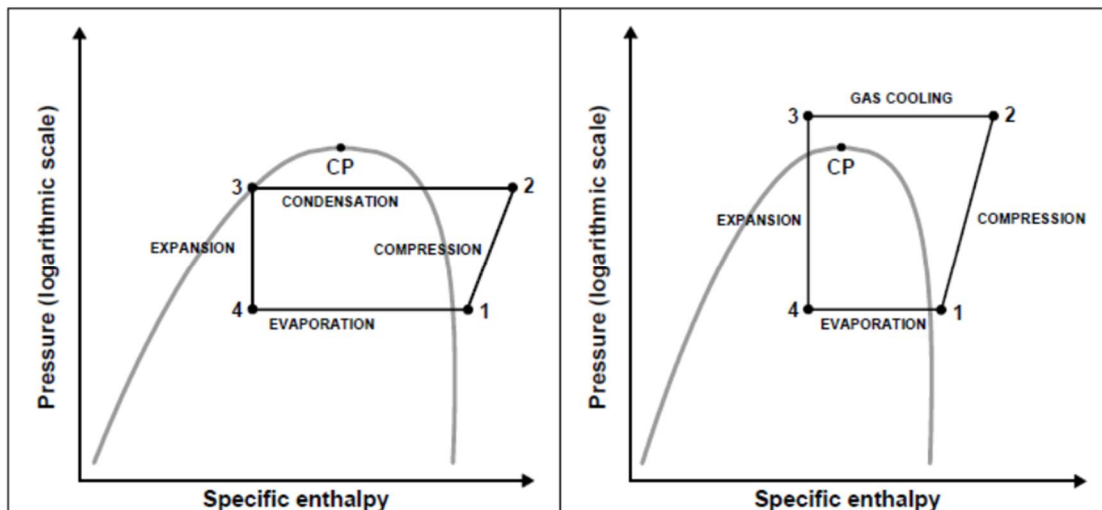
figuren visar är risken stor för att vattenmolekyler skapar vattendroppar (Dr Pearson, 2014, s. 35), (Marketing, 2007, s. 15,18,19).



Figur 4. Vattenlöslighet i koldioxid (Marketing, 2007, s. 15)

## 5. Koldioxid kylprocesser

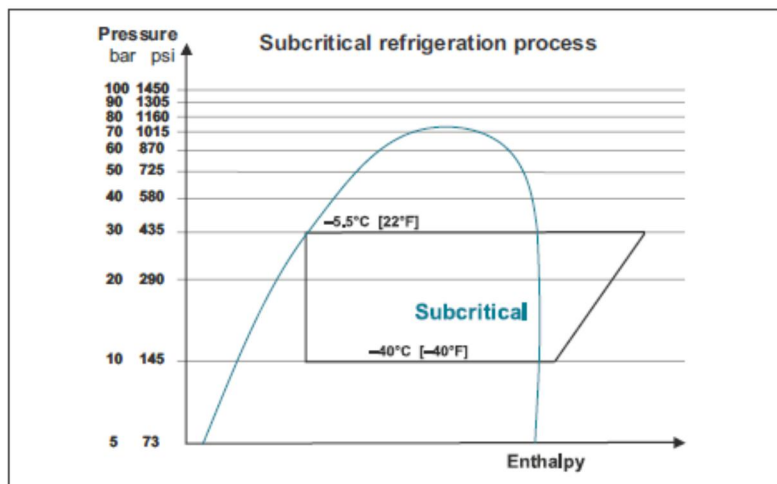
I detta kapitel introduceras koldioxidens två kylprocesser. Koldioxid har två kylprocesser som endera fungerar i en sub-eller transkritisk process. Det är viktigt att förstå skillnaden mellan dessa två, eftersom de inte kan förekomma i sub-eller transkritiska processer samtidigt. Med traditionella köldmedier och kylprocesser rör man sig enbart på en subkritisk nivå. Kylprocessen är subkritisk då processen sker i log  $p$ ,  $h$ -diagrammet under den kritiska punkten (Figur 5). Då kylprocessen överstiger den kritiska punkten talar man om en transkritisk process (Figur 6). Termerna som används för de båda kylprocesserna är så gott som lika. Vid en transkritisk process kondenseras inte köldmediet utan i stället kyls köldmediet ner i en gaskylare. Därmed heter kondensorn för en transkritisk process gaskylare (Danfoss, 2004, s. 4-5).



Figur 5. Subkritisk process (Danfoss, 2004, s. 5) Figur 6. Transkritisk process (Danfoss, 2004, s. 5)

## 5.1 Subkritisk process

Koldioxid kan användas i kylsystem som vilket annat traditionellt köldmedium som helst: i detta fall är det frågan om en subkritisk process (Figur 7 nedan), d.v.s. man överskrider inte den kritiska punkten vid  $\log p$ ,  $h$ -diagrammet. För en subkritisk process kondenseras kylmedlet normalt i en kondensor. Problemet med en subkritisk koldioxidkylprocess är att förångningstemperaturen blir låg. Detta fungerar bra i frysdiskar som normalt har en lägre förångningstemperatur. Men för kyldiskar som verkar vid en förångnings temperatur på  $-8\text{ °C}$  (som även kallas till pluskylskåp), fungerar enbart transkritiska kylprocesser. Kondenserings temperaturen för en subkritisk koldioxidprocess är också låg (vid eller under  $31\text{ °C}$ ). Detta betyder att kondenseringen inte kan ske där den omgivande temperaturen är högre eller samma som  $31\text{ °C}$  vilket är ett problem i varma klimat. Vid en kaskadkylmaskin (rubrik nedan) fungerar koldioxid vanligen i en subkritiskprocess (Danfoss, 2004, s. 3-4).



Figur 7. Subkritisk process (Danfoss, 2009)

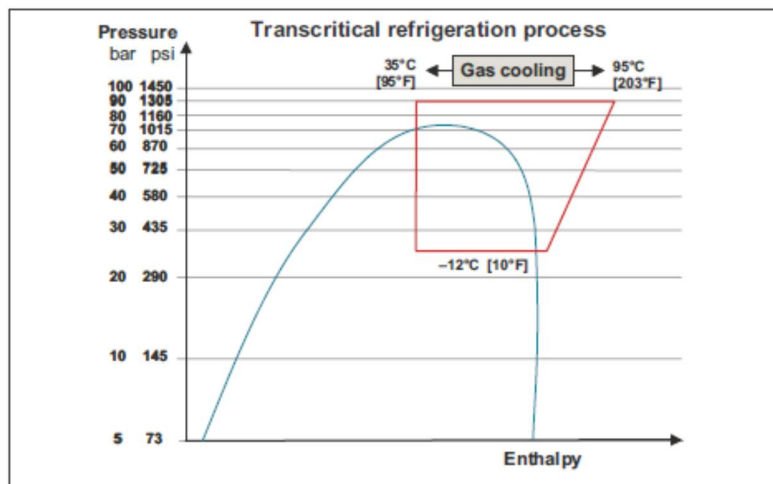
## 5.2 Transkritisk process

En transkritisk kylprocess talar man om när värmeöverföringen och högtryckssidans tryck överskrider den kritiska punkten (Figur 8 nedan). Med kritisk punkt syftar man på den punkt där skillnaden mellan vätska och gas upphör och ämnet blir superkritiskt. Superkritisk vätska förekommer då ett ämne har ett så högt tryck och temperatur att fasgränsen mellan vätska och gas försvinner. Processer som rör sig över den kritiska punkten kallas för transkritiska processer. Nackdelen med att röra sig inom en transkritisk kylprocess är att trycket i processen är hög

I och med att en transkritisk process rör sig över den kritiska punkten kondenseras inte köldmediet i en kondensor utan istället kyla köldmediet ner i en gaskylare. Därmed bibehålls köldmediet i en konstant mellanform mellan gas och vätska. Således kommer temperaturen hos köldmediet att förändras genom hela gaskylaren men trycket kommer att hållas konstant. Eftersom detta är en "en fas" process (d.v.s. köldmediet ändrar inte fas) är trycket och temperatur oberoende av varandra. I ett transkritiskt kylsystem som har en fastslagen expansionsventil (som inte går att reglera t.ex. kapillär rör), bestäms trycket i gaskylaren enbart med hjälp av hur mycket köldmedium som laddats in i systemet (Danfoss, 2004, s. 3-4).

Skillnaden mellan traditionella köldmedium och koldioxid är att man i traditionella kylsystem inte rör sig inom ett transkritiskt område. Nackdelen med en transkritisk koldioxidprocess är att högtryckssidans drifttryck rör sig mellan 90 och 120 bar. Med dagens teknik och komponenter är det inte ett problem att röra sig i höga trycknivåer men man bör ändå känna till det höga trycket. Förutom det höga drifttrycket är också köldfaktorn mycket lägre än vad den är i traditionella subkritiska kylprocesser som fungerar vid samma temperaturområden (Danfoss, 2004, s. 3-4).

Tack vare den höga värmeöverföringstemperaturen i transkritiska koldioxidsystem (mellan 95 och 35 °C), är det lönsamt att ta tillvara värmen från gaskylaren och t.ex. förvärma varmvattnet i affärer. Självklart kan man också ta tillvara kondensvärmen av traditionella subkritiska kylprocesser, men temperaturen där är mycket lägre än vad den är vid transkritiska koldioxidprocesser (Danfoss, 2004, s. 3-4), (Rohrer, 2006, s. 1).

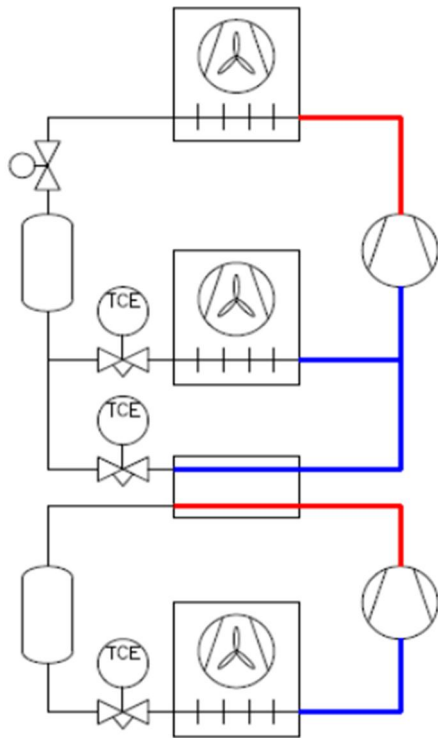


Figur 8. Transkritisk process (Danfoss, 2009)

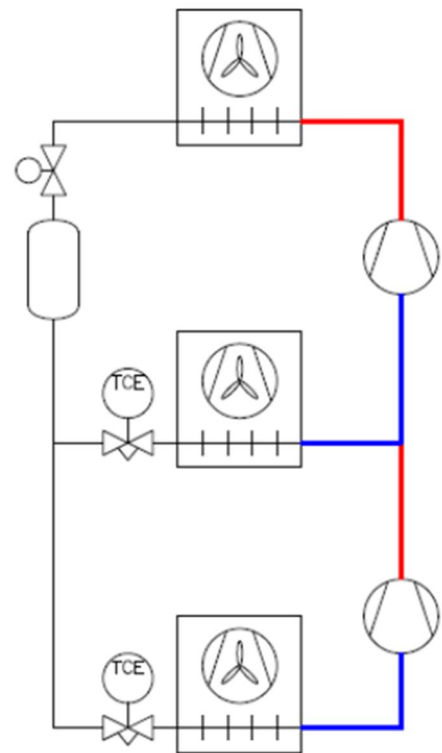
## **6. Koldioxid kylsystem**

I detta kapitel introduceras två olika koldioxidkylsystem: kaskadsystemet och det transkritiska-booster systemet. De första koldioxidkylsystemen bestod av subkritiska kaskadmaskiner och senare introducerades den transkritiska boostermaskinen. Verkningsgraden i maskinerna, särskilt i varma klimat, har förbättrats ytterligare genom parallellkompression och genom utveckling av gas- och vätskeejektorer (Kaappola, 2012, s. 3).





Figur 9. Kaskadmaskin. (Kaappola, 2012)



Figur 10. Boostermaskin. (Kaappola, 2012)

## 6.1 Kaskadmaskin

Finlands första koldioxidkylmaskiner bestod av direktexpanderande eller pumproterande kaskadkylsystem (Figur 9). Principen för ett kaskadsystem är att det mellan två kylsystem finns en kaskadvärmeväxlare. Värmeväxlaren är placerad mellan den låga och höga temperaturen (förångaren och kondensorn). Värmeväxlaren fungerar vid den låga temperaturens maskin som en kondensor, och för den höga temperaturens maskin som en förångare. Kylprocessen vid den låga temperaturens maskin är vanligen subkritisk. Det finns en kaskadvärmeväxlare mellan systemen eftersom kondenseringstemperaturen vid den subkritiska processen blir för låg för att avge värme till omgivningen. Därmed är förångaren från den höga temperaturmaskinen kopplad parallellt med låga-temperaturens kondensor så att kondenseringen kan ske vid en lägre temperatur (Danfoss, 2010, s. 2).

Vanligen använder man sig av två olika köldmedium i en kaskadmaskin. För den höga temperatursektionen använder man ofta ammoniak och för den lägre temperatursektionen använder man koldioxid. Figuren ovan visar en enkel koppling för ett kaskadkylsystem. I figuren ser man tydligt kaskadvärmeväxlaren som fungerar vid det låga trycket och temperatur som en kondensor (Kaappola, 2012, s. 3), (Danfoss, 2010, s. 2).

## 6.2 Boostermaskin

I dagens läge är den transkritiska koldioxid boostermaskinen den vanligaste inom af-färskyla (Figur 10). Principen för en boostermaskin är att både låg-och högtrycks kompressorer är seriekopplade och ingen kaskadvärmeväxlare som sänker effektiviteten förekommer i systemet. Beroende på omgivningstemperaturen kan en boostermaskin fungera i endera sub-eller transkritiskprocess. Vanligen använder man sig av transkritiska boostermaskiner. Ett typiskt transkritiskt boostersystem är uppdelat i tre trycksektioner. Högtryck, mellantryck och lågtryck. Komponenter som förekommer i ett transkritiskt boostersystem är:

- (LT low temperature) förångare
- (MT medium temperatur) förångare
- (LP low pressure) kompressor
- (HP high pressure) kompressor

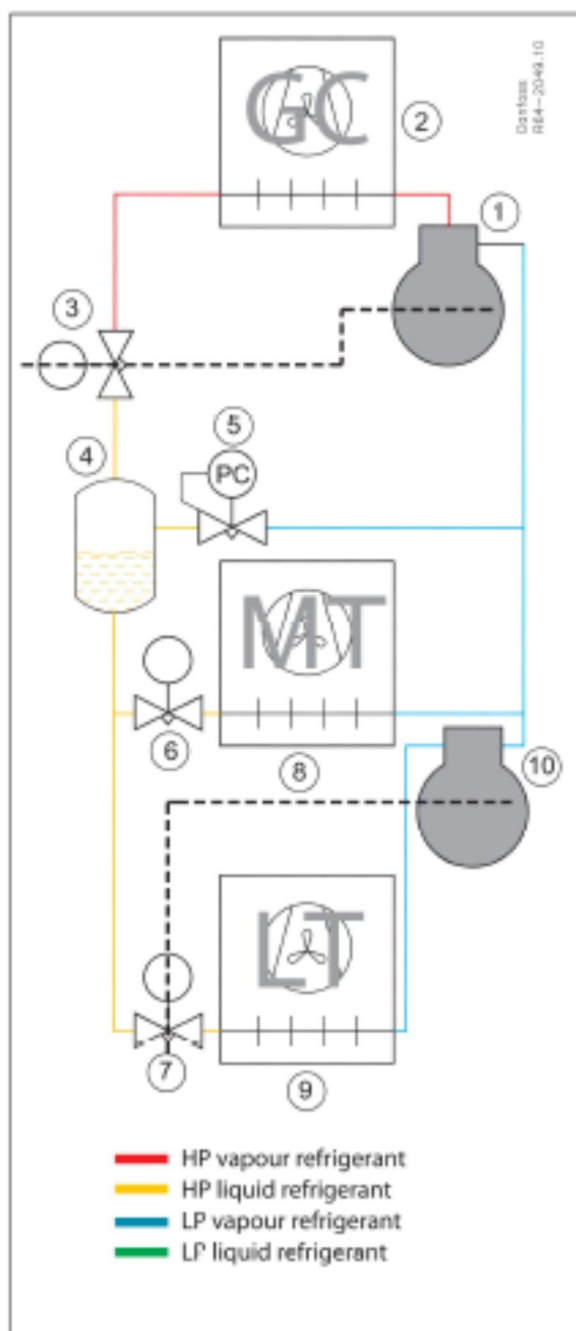
- Gas kylare
- Köldmedium beredare
- Expansionsventiler
- Regleringsventiler

Skillnaden mellan en ”vanlig” boostermaskin och en boostermaskin med *gas bypass* är att man kan reglera trycket i hela kylprocessen. Därmed säkras att kylprocessen hålls stabil. *Gas bypass* sker direkt från kylberedaren via en regleringsventil till högttryckskompressorn. Figur ovan visar ett enkelt kopplingsschema för en boostermaskin (Kaappola, 2016, s. 7).

Figur 11 nedan förklarar hur ett transkritiskt boostersystem med *gas bypass* fungerar. Högtrycksektionen börjar vid högtryckskompressorn (1) och fortsätter via gaskylaren (2) till högtryckets kontrollventil (3). På grund av det höga trycket, är ventilen vanligtvis dimensionerad att hålla ett tryck mellan 90 och 120 bar. Mellantryckssektionen börjar vid högtrycksexpansionsventilen (3), varav flödet delas in i gas och vätskeform i beredaren (4). På grund av att den delvis kvarblivna gasen inte kan förvandlas till vätskeform i beredaren, är den förbikopplad via en ventil (5) som går tillbaka till högtryckskompressorn. Kylvätskan som är i beredaren flödar vidare till expansionsventilerna (6 och 7) där kylmedlet förångas i (8) (MT, Medium Temperature) (9) (LT, Low Temperature) förångaren. Kylgasen från (LT) förångaren pressas i en lågtryckskompressor (10) och blandas med kylgas från (MT) förångaren och från den förbikopplade ventilen (5). Därefter fortsätter gasen till HP kompressorn (1) och kretsen avslutas. Trycket för MT sektionen är oftast mellan 40 och 45 bar. Gällande LT sektionen rör man sig oftast vid ett 25 bars tryck. Vanligen dimensionerar man både MT och LT sektionerna till samma tryck och således är det behändigt att använda sig av komponenter i samma tryckklass (Danfoss, 2015, s. 2).

Fördelen med en koldioxid boostermaskin är att man enbart använder sig av koldioxid som köldmedium. Boostermaskiner med parallell kompression är relativt nytt inom kyltekniken. Principen för ett parallellkopplat boostersystem är att den kvarblivna kylgasen från kylberedaren direkt pressas i en högtryckskompressor. Därmed är det möjligt att nå det absolut högsta trycket som därmed förbättrar energieffektiviteten i hela kylproces-

sen. Boostermaskin med ejektorer är det nyaste inom kylsystem med koldioxid. Ejektorer är speciellt intressanta inom koldioxid kylsystem för att man i teorin kan utnyttja 20 % av kompressorns arbete (Kaappola, 2016, s. 7), (Danfoss, 2015, s. 2) (Danfoss, 2009, s. 45-47).



Figur 11. Transkritisk boostersystem med gas bypass (Danfoss, 2010, s. 2)

## 7. Återvinning av kondensvärm

I detta kapitel behandlas allmänt kondensering, exempellösningar på hur man utnyttjar kondensvärm och vad det innebär när man talar om värmeåtervinning inom koldioxid kylprocesser. Kondensering är en av de grundläggande funktionerna i en kylprocess. Kondensering sker när den bundna värmeenergin av förångaren och den inmatade el energin till kompressorn avger värme ur en kondensor. Kondenseringstemperaturen är fullständigt beroende av vilket köldmedium och tryck som används i processen (Danfoss, 2011, s. 2-6).

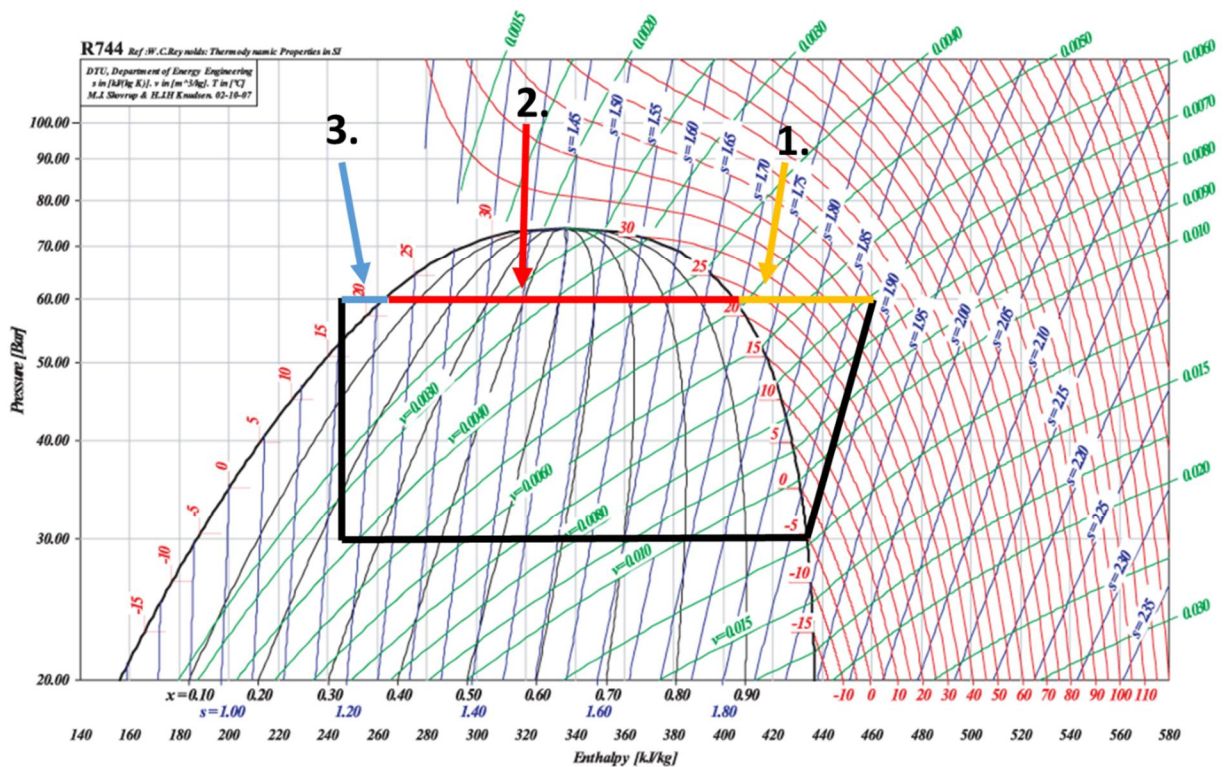
I affärer där kylanläggningar avger mycket värme vid kondensering försöker man utnyttja det på olika sätt. I dagens läge använder man i allmänhet kylutrustningar med dörrar och frysdiskar med lock, vilket för sin del sänker på kylbehovet och därmed minskar på kondensorvärmen. Då man planerar att ta tillvara kondensorvärme i livsmedelsaffärer är det viktigt att minnas att man inte får sänka på köldfaktorn i kylsystemet (Danfoss, 2011, s. 2-6).

### 7.1 Allmänt om kondensering

Som ovan nämnts är kondensering en av de fyra grundläggande händelserna i en kylprocess. Vid kondensation i en subkritisk process sker det en fasförändring i köldmediets tillstånd där köldmediet ändrar fas från gas till vätska. Energin som frigörs i kondensorn består av tre delar som innehåller tre olika faser: överhettad ånga, den verkliga kondenseringen och underkylning. Procentuellt består ca 80-90% av den verkliga kondenseringen. Cirka 10-20% består av överhettad ånga och ca 0-5% består av underkylning. I Figur 12 nedan är en kylprocess ritad i ett log  $p$ ,  $h$ -diagram. De färgade och num-

rerade linjerna vid kondenseringen förklarar vilka faser köldmediet är under kondenseringen.

1. Överhettad ånga. Vid den gula linjen är köldmediets tillstånd som överhettad ånga.
2. Verkliga kondenseringen. Vid den röda linjen sker den verkliga kondenseringen där köldmediets fas ändrar från gas till vätska.
3. Underkylning. Ligger vid den blåa linjen.



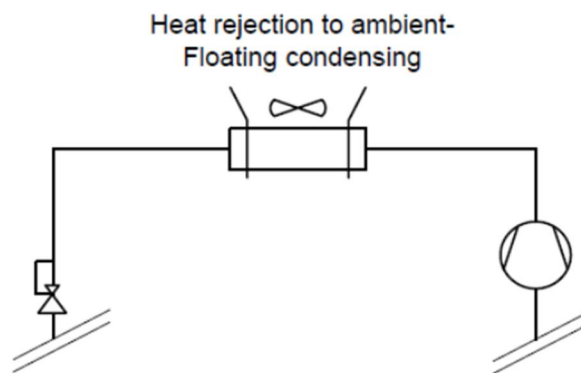
Figur 12. Subkritisk kylprocess med ritad kondensering (SWEP)

Kondensering kan ske både direkt eller indirekt. Vid en direkt kondensering avges kondensatvärmen direkt till omgivningen, medan värmen vid en indirekt kondensering är kopplad till en värmeväxlare (Henry, 2012, s. 9) (Danfoss, 2011, s. 2-6), (Henry, 2012, s. 9).

## 7.2 Exempel kopplingar av värmeåtervinning från kondensorvärme

### Flytande kondensering

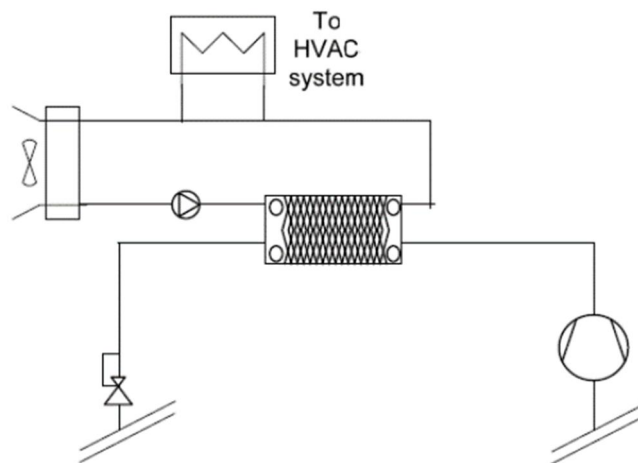
Syftet med denna lösning är att låta värmen förflytta sig direkt till omgivningen. Detta betyder att kondensortemperaturen följer omgivningstemperaturen till en minimal kondensnivå som vanligtvis är 10 °C. Figur 13 nedan visar ett schematiskt kylsystem med flytande kondensering, som avger värme direkt till omgivningen (Sawalha & Chen, 2010, s. 13).



Figur 13. Värmeöverföring med flytande kondensering (Sawalha & Chen, 2010, s. 13)

### Fixed head pressure (FHP)

I denna värmeåtervinningslösning fungerar systemet också i flytande kondensering. I denna lösning är kondensorn kopplad till ett HVAC-system. Vid uppvärmningsbehovet höjs trycket så att temperaturen i kondensorn når den temperatur som behövs för uppvärmningen av system som är kopplade till kondensorn. Figur 14 nedan visar ett värmeåtervinningssystem som är kopplad till ett HVAC-system (Sawalha & Chen, 2010, s. 14).

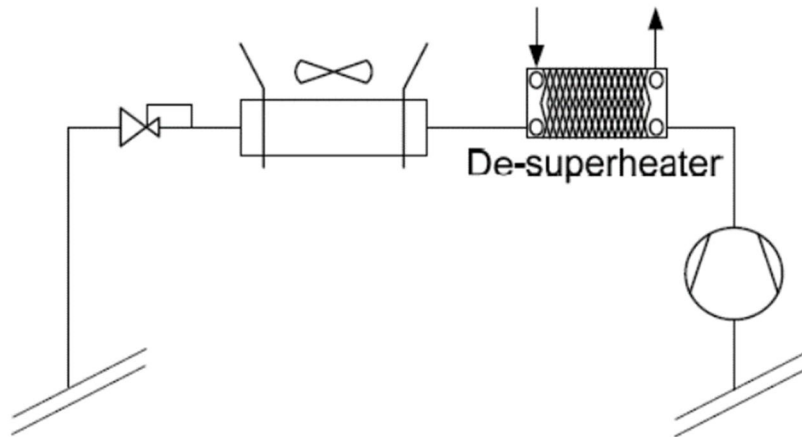


Figur 14. Värmeöverföring kopplat till ett HVAC system (Sawalha & Chen, 2010, s. 14)

### Ångkylare

Värmeåtervinningslösningen fungerar ur en ångkylare som är placerad före själva kondensorn. Beroende på temperaturnivån som nås i köldmediet, kan man överföra värme till en värmeväxlare som sedan är kopplat till ett VVS-system. Kondenseringstryck och temperatur styrs enligt värmebehovet. Denna värmeåtervinningslösning är möjlig för köldmedium som har en hög utsläppstemperatur som t.ex. koldioxid och ammoniak. Figur 15 nedan visar en ångkylare som är placerad före själva kondensorn (Sawalha & Chen, 2010, s. 14-15).





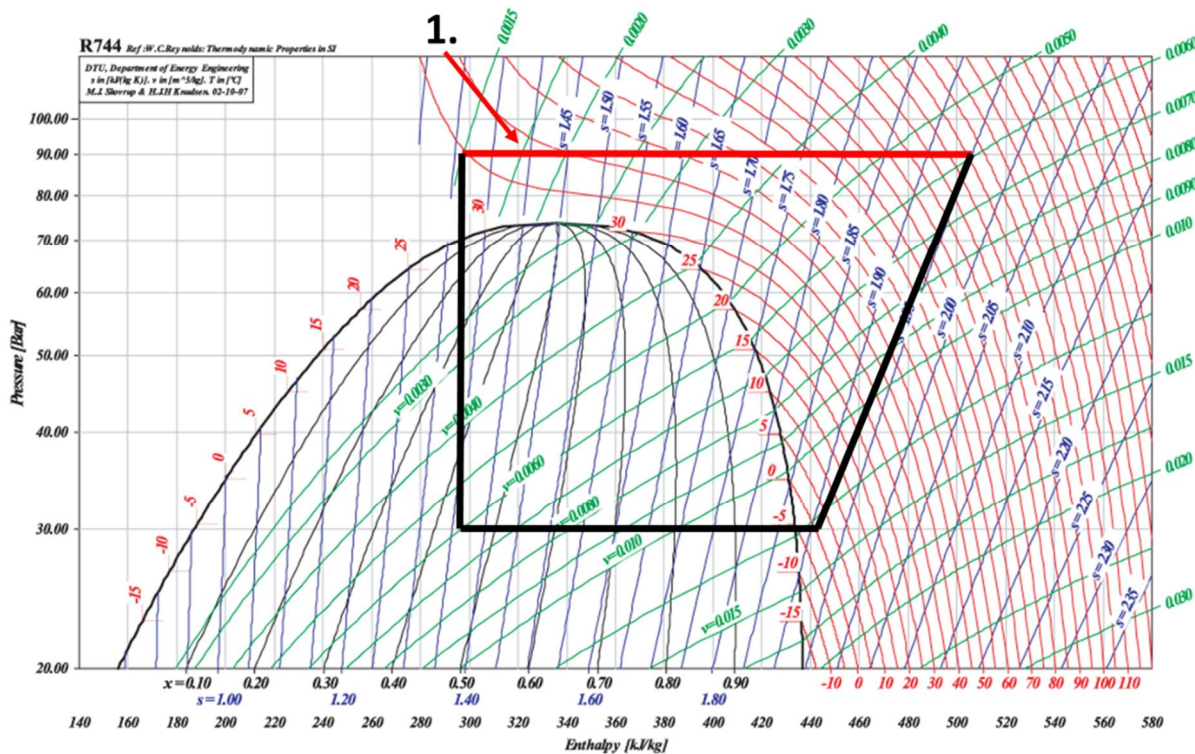
Figur 15. Värmeöverföring ur en de-superheater (Sawalha & Chen, 2010, s 14)

### 7.3 Värmeåtervinning i koldioxidkylsystem

Som tidigare nämnts är kondensortemperaturen låg i traditionella kylsystem. Detta betyder att man enbart kan tillämpa kondensvärmen till vissa ändamål. Figur 16 nedan förklarar var i  $\log p$ ,  $h$ -diagrammet gaskylningen i transkritiska processer sker (Sawalha, 2012, s. 145-156).

Fördelen med en transkritisk koldioxid boostermaskin är att den vid gaskylningen producerar en stor mängd värme som är behändig att ta tillvara. Den höga temperaturen som nås vid urladdningen av koldioxid kompressorer möjliggör värmeåtervinning vid olika temperaturnivåer t.ex. för uppvärmning av varmvatten (50–70 °C), direktuppvärmning av rum (40–50 °C) eller snösmältning vid affärer (30–40 °C) (Polzot, et al., 2016, s. 649).

Med tanke på att en transkritisk koldioxid kylprocess avger värme genom en ”en fas” gaskylning (där kylmedlet behålls i en konstant gas form), kan dessa tre temperaturnivåer som nämnts ovan uppfyllas med tre värmeväxlare. Den första placeras före gaskylaren (fungerar som en ångkylare vars uppgift är att sänka på temperaturen och ta till godo värmen av den överhettande kylången). Den andra är i sig själv kylsystemets gaskylare och den tredje är en underkylare som är placerad efter gaskylaren. (Polzot, et al., 2016, s. 649).



Figur 16. Transkritisk kylprocess, området i processen där gaskylning sker är markerat med rött (SWEP).

För att uppnå det maximala COP värdet för systemet bör utloppstrycket efter kondensorn vara optimerat. Sawalha uppskattar att värmeåtervinning av ångkylaren (värmewäxlaren som är placerad före gaskylaren) kan täcka hela uppvärmningsbehovet vid en medelstor supermarket i relativt kalla klimat som leder till en reduktion i den årliga energiförbrukningen. Det transkritiska koldioxidkylsystemet med värmeåtervinning har visat sig vara en effektiv lösning i milda klimat där i genomsnitt den årliga och dagliga temperaturen varierar. Det är beräknat att med transkritiska koldioxidkylsystem sparar man mellan 3,6% till 6,5% mera energi än med ett så kallat baslinjesystem (där koldioxid och t.ex. R410 används) (Sawalha, 2012, s. 145-156) (Polzot, et al., 2016, s. 649).

## 8. Montrealprotokollet

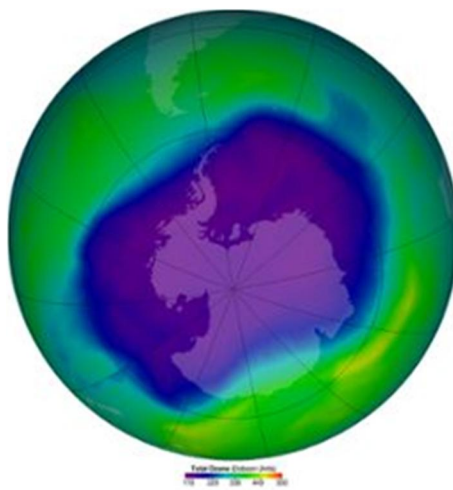
På 1920 och 1930-talet var det allmänt att mindre kylanläggningar använde extremt giftiga köldmedium så som  $\text{SO}_2$  (svaveldioxid) och  $\text{CH}_3\text{Cl}$  (klormetan). Mellan dessa år ökade behovet ytterligare av mindre kylanläggningar och därmed ersattes dessa giftiga

köldmedium med CFC kemikalier. Jämfört med alla andra köldmedier som användes på den tiden var CFC ofarliga och extremt stabila kemikalier. På den tiden var även utvecklingen av CFC en stor framgång inom kylteknik. Konsekvenserna för den globala uppvärmningen och de massiva utsläppen av köldmedium från kylanläggningar kunde inte förutses då. Mängden köldmedium som gick förlorad till atmosfären var slarvig underhållspraxis överskred oftast den mängd som laddats in i systemen. Därmed resulterade det i en ökad efterfråga av CFC köldmedier. Detta bidrog starkt till framgången för CFC inom kyltekniken. Fördelen med CFC var att det var relativt billigt, lätt att hantera, giftfritt och kemikaliskt o reaktivt. Ett av elementen som CFC föreningar består av är Cl (klor). Forskningar visar att vid ozonskiktet bryts CFC föreningar ner av solens ultravioletta strålning och därmed frigör föreningen Cl (klor) atomer. Detta leder till att det frigjorda klorat reagerar med ozonskiktet. Figur 17 nedan visar ozonhål vid Antarktis den 24 september 2006 (Dr Pearson, 2014, s. 12-15).

Fram till 1950-talet fortsatte ammoniak att vara det prefererade köldmediet inom industriella kylapplikationer (större kylanläggningar). Vid början av 1950-talet introducerades växthusgaser så som HCFC och CFC blandningar (R502). Dessa köldmedium var mer lämpade inom industriella kylanläggningar p.g.a. deras låga kokpunkt och volymkylnings effekt. Detta gjorde dem särskilt lämpliga för användning i större med lägre temperatur fungerande kylsystem (frysar). Därmed minskade behovet av ammoniak inom kyltekniken. Vid 1970-talet använde flera länder betydande mängder av dessa växthusgaser (CFC och HCFC) i alla sektorer inom kemisk industri. Koldioxid, som då ännu användes i viss grad, försvann sakta på 1950-talet då de äldre anläggningarna ersattes av CFC eller HCFC köldmedier. Forskningar i början av 1980-talet visade att klor i CFC och HCFC kemikalier fungerade som en katalysator i förstörelsen av ozonskiktet. Tack vare forskningarna ledde det till utvecklingen av "Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer". Protokollet undertecknades år 1987 och trädde i kraft den 1 januari 1989. Protokollet är skyddat av FN:s miljöprogram (UNEP). Syftet med protokollet är att stegvis minska och slutligen stoppa användningen ozonnedbrytande ämnen. Fram till år 2010 har man lyckats minska på utsläppen av ozonnedbrytande gaser med 98%. Därmed har också halterna av klor och brom så småningom sjunkit i stratosfären (Dr Pearson, 2014, s. 12-15).

Användningsförbud av f-gaser (kemikalier som innehåller fluor) tillsattes i protokollet år 2016. Ändringen av dessa f-gaser i protokollet träder i kraft den första januari 2019. För tillfället har 197 länder skrivit under protokollet och det sägs att protokollet är det ”mest framgångsrika klimatavtalet någonsin”. Protokollet säkerställde att produktionen av CFC kemikalier avslutades år 1995 och i utvecklingsländer den 1 januari 1996. Mellan år 1992 och 1995 ökade användningen av HCFC kemikalier för att påskynda utfasningen av de mer ozonförstörande CFC kemikalier. Användningen av HCFC kommer gradvis att minska till år 2030 då det därefter inte mera får förekomma HCFC kemikalier (Dr Pearson, 2014, s. 12-15).

En del länder i den Europeiska unionen (bl.a. Finland) förbjöd användningen av HCFC kemikalier redan år 2015. Vissa länder har antagit ännu strängare åtgärder: Sverige har förbjudit användningen av R22 sedan januari 1998. Tyskland och Danmark genomförde användningsförbud av HCFC kemikalier år 2000. I Österrike har det sedan år 2002 varit förbjudet att använda HCFC kemikalier. Vid en forskning som utfördes år 2006 uppskattades det att användningen av dessa skadliga växthusgaser ännu stod för ca 70 % av ozonskiktnekbrytningen. Vid början av 1990-talet fokuserade man starkt på bättre köldmedium med lägre GWP-värden. I och med det introducerades koldioxid som ett av alternativen (UNEP, 2016, s. 14), (Finel & Tommi, 2018), (Dr Pearson, 2014, s. 12-15), (Miljöministeriet, 2017).



## **8.1 EU-direktiv**

Den europeiska unionen har lagt ut bestämmelser (EU-förordning: 517/2014) angående f-gaser d.v.s. föreningar som innehåller fluor. Av de köldmedium kategorier som nämnts i början av arbetet är det enbart oorganiska och HC-köldmedier som inte innehåller fluor. Följande köldmedium hör till kategorin f-gaser: hydrofluorocarbon (HFC), perfluorokarboner (PFC) och svavelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Även om hydrofluorolefin (HFO) innehåller fluor, är den inte reglerad under EU-förordningen: 517/2014. Förordningens syfte är att minska på utsläpp av dessa gaser som innehåller fluor med två tredjedelar till år 2030. Tillverkare och konsumenterna av dessa råmaterial bör årligen rapportera sin användning till EU-kommissionen. Förordningen trädde i kraft den 9 juni 2014 (tidning, 2014).

Den europeiska förordningen (EU-förordning: 1005/2009) innehåller bestämmelser om ämnen som bryter ned ozonskiktet. Ozonnedbrytande föreningar har tack vare Montrealprotokollet fått användningsförbud. Därmed innehåller förordningen bestämmelser angående produktion, import, export, försäljning, användning, återvinning, återanvändning och destruktion av ämnen som skadar ozonskiktet. Förordningen fastställer rapporteringskrav och åtgärder för produktion och utrustning som använder dessa ämnen. Förordningen trädde i kraft den 20 november 2009 (tidning, 2014), (tidning, 2009).

## **9. Introduktion till den teoretiska jämförelsen av köldmedier**

I detta kapitel görs en teoretisk jämförelse mellan fyra köldmedier som hör till kategorin oorganiska och HC-köldmedier. Köldmedium som jämförs är: koldioxid (R744), ammoniak (R717), propan (R290) och isobutan (R600a). På grund av att dessa kategorier inte blivit reglerade av varken Montrealprotokollet eller EU-direktiven, är det de ovan nämnda köldmedier som företag inom kylteknik nu och i framtiden kommer att använda. Via en e-post intervju med Kåre Lindroos, Head of Technology Unit, Huurre

Group Oy, frågades det vilka framtidsplaner och köldmedier de anser vara viktiga inom kyltekniken. Enligt Kåre Lindroos är år 2022 det kritiska året då alla kylanläggningar bland livsmedelskyla bör använda sig av köldmedier som har ett GWP-värde lägre än 150. Detta betyder att alla HCFC och fluorbaserade köldmedium bör ersättas med miljövänligare substanser. Problemet med en del av dessa köldmedier som har ett GWP-värde lägre än 150 är att de oftast är hydrokarboner som är explosiva och brandfarliga (Lindroos, 2018).

I dagens läge säljs det huvudsakligen centrala kylmaskiner som fungerar med koldioxid som köldmedium. Vid kylanläggningar som kräver höga köldeffekter (oftast industriella applikationer med flera MW) använder man sig vanligtvis av ammoniak (R717). Propan (R290) har blivit allt vanligare inom Plug-in kylskåp (kylskåp som fungerar med egen kylmaskin och egen el-kabel). Problemet med propan är dock att det är en explosiv substans och att EU-kommissionen begränsat fyllningsnivån av propan med 150g/maskin. Enligt Kåre Lindroos är de säkraste köldmedier inom framtiden: koldioxid, ammoniak, propan och isobutan. Priset på koldioxid har också stigit. Inom ett år har priset på koldioxid enligt Kåre Lindroos stigit med upp till 500 %.

Via en e-post intervju med Anders Broberg, E&P Offer Deployment Manager, Air Liquide Gas AB, frågades det om de sett en ökad produktion av koldioxid nu när koldioxid blivit allt vanligare inom kyltekniken. Enligt Anders Broberg har de inte direkt sett en ökad produktion av koldioxid men däremot har de sett en ökad efterfrågan på just koldioxid av företag inom kylindustrin. Jämförelsesdelen består av en tabell där de ovannämnda köldmedierna jämförs: koldioxid, ammoniak, propan och isobutan (Lindroos, 2018) (Broberg, 2018).

## **9.2 Propan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (R290)**

Propan hör till kolvätegruppen (HC-köldmedier). Kemiskt sett är propan ett stabilt köldmedium som inte reagerar med olika material eller olja. Propan har redan länge använts i mindre kylutrustningar och främst i Plug-in kylskåp. Problemet med propan är att det är en brandfarlig och explosiv substans. Oftast är graden av brandrisk för propan

i kylanläggningar överdriven i jämförelse med flytgas som befinner sig i större anläggningar. Allmänt är kolväten giftfria och på sin höjd mildt narkotiska. Propan skapar inte heller syror som sänker på livslängden i kylutrustningar. GWP-värdet för propan är 3 (Aalto, et al., 2012, s. 120).

### 9.3 Isobutan C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (R600a)

Isobutan har redan länge använts inom kyltekniken i Europa. Isobutanens ångtryck är lågt och förångningstrycket kan även sjunka till undertryck. Detta är en nackdel ifall det sker små läckage i förångaren som därmed möjliggör luft och fukt att tränga in i kylsystemet. Köldfaktorn är god för isobutan. Nackdelen med isobutan är att det krävs en mycket hög köldmedium fyllning för att kylprocessen skall fungera bra. Skillnaden mellan butan och isobutan är i dess atomordning. Vid butan är kolatomerna bundna i en rak linje och vid isobutan är kolatomerna förgrenade. Därmed har isobutan ett litet *a* i slutet av sitt köldmedium nummer. Kokpunkten för isobutan är också lägre än vad den är för butan (Aalto, et al., 2012, s. 120).

### 9.4 Ammoniak NH<sub>3</sub> (R717)

Ammoniak introducerades till kyltekniken redan i början av 1800-talet. Tack vare ammoniakens goda egenskaper har den sedan dess varit ett betydande köldmedium inom kylteknik branschen och speciellt inom stora s.k. industriella kylanläggningar. Ammoniak används för övrigt också inom kemisk industri. Ammoniak är en polär substans, vilket är anledningen till att förångningstemperaturen är högre än vad en stor del andra köldmedium har. Molvikten för ammoniak är 17g/mol. Tack vare den låga molvikten och den höga förångningstemperaturen blir ångtrycket högre än bland andra köldmedium och i och med det är kondensstrycket högt (Aalto, et al., 2012, s. 116).

### 9.5 Koldioxid CO<sub>2</sub> (R744)

Koldioxid är ett gammalt köldmedium som användes redan i mitten av 1800-talet i kylanläggningar. Koldioxid hör till gruppen oorganiska köldmedier och är därmed inte skadlig för klimatet. Koldioxid har en del specialegenskaper jämfört med traditionella köldmedier. Största skillnaden ligger i dess låga kritiska punkt.

## 9.6 Jämförelse mellan köldmedier

I detta kapitel jämförs fyra köldmedier som nu och i framtiden kommer att spela en betydande roll inom kyltekniken. Köldmedium som jämförts är: propan (R290), isobutan (R600a), ammoniak (R717) och koldioxid (R744). Dessa köldmedier har i genomsnitt goda egenskaper och deras största fördel ligger i deras miljövänlighet.

För att en kylprocess skall fungera bra är det viktigt att köldmedier har goda termodynamiska egenskaper som t.ex. högt kritiskt tryck och temperatur. Med termodynamiska egenskaper syftar man på egenskaper så som: förångningstemperatur, specifik volym och ångtryck. Utöver de termodynamiska egenskaperna bör också köldmedier vara miljövänliga, giftfria och gärna icke brandfarliga. I tabellen nedanför framstår det åtta punkter som beskriver egenskaperna av de ovannämnda fyra köldmedierna. Som bilagor framstår  $\log p$ ,  $h$ -diagram på de ovannämnda köldmedierna.

Nedan finns en förklaring på en del av de egenskaper som anses vara betydande i ett köldmedium:

### **GWP-värde (Global Warming Potential):**

Med GWP-värdet syftar man på ett förhållande som beskriver en substans förmåga att värma upp klimatet. Som jämförelsevärde använder man koldioxid, som har ett GWP-värde på 1. Krav från både EU-kommissionen och Montrealprotokollet har lagt ut bestämmelser på att köldmedier (inom livsmedelskyla) fr.o.m. år 2022 inte får ha ett högre



GWP värde än 150. Tack vare dessa krav, har traditionella köldmedier fått användningsförbud (Aalto, et al., 2012, s. 102-105).

Gas	ppm	%
Kväve	780 840	78,08

**ODP-värde (Ozon Depletion Potential):**

Med ODP-värdet syftar man på ett förhållande som beskriver en substans förmåga att förstöra ozonskiktet jämfört med ett CFC köldmedium (R11) som har ett ODP värde på 1. Som tidigare nämnts, bör alla nya kylanläggningar använda sig av köldmedier som har ett ODP-värde på 0 (Aalto, et al., 2012, s. 102-105).

### **Brand-och toxiska köldmedier:**

Köldmedier är uppdelade i säkerhetsklasser enligt den europeiska normen (EN 378-1). Säkerhetsklasserna baserar sig på köldmediernas brännbarhet och giftighet. Brännbarhetsklasser är:

- 1 Oförbrännbara i luften
- 2 Nedre antändningsgräns i luften är minst eller mer än 3,5 %
- 3 Nedre antändningsgräns i luften är under 3,5 %

Toxicitetsklasser är:

- A Ämnen med tillåten halt är över 400 ppm
- B Ämnen med tillåten halt är högst 400 ppm

(Kapanen, 2017).

*Tabell 2. Koncentration av gaser i atmosfären (Laitos, 2017)*

<b>Syre</b>	209 460	20,94
<b>Argon</b>	9 340	0,93
<b>Koldioxid</b>	400	0,04

Av dessa fyra köldmedium är propan (R290) och isobutan (R600a) klassificerade som A3:e klassens köldmedier. Ammoniak (R717) är klassificerad som B2: a klassens köldmedier och koldioxid (R744) är klassificerad som A1 klassens köldmedium. Koldioxid är den enda substansen av dessa fyra köldmedier som inte är brännbar. Däremot har koldioxid en egenskap att släcka bränder och tränga ut syre från omgivningen. Även om ammoniak är klassificerad som B2 klassens brandfarliga köldmedium, bör ammoniakhalten i omgivningen stiga mellan 13,1% och 26,8% för att vara explosiv. För att ammoniak skall skada människor räcker det att halten ammoniak i omgivningen är mellan 150 ppm och 200 ppm. Detta är en låg halt och i fall ammoniak kommer i kontakt med människor är det väldigt skadligt (Aalto, et al., 2012, s. 102-103, 116-117), (Kapanen, 2017, s. 1-14), (Laitos, 2017), (Ympäristökeskus, 2015).

*Tabell 3. Jämförelsetabell av köldmedier (Åkermarck, 2018)*

<b>Köldmedium nummer</b>	<b>R290</b>	<b>R600a</b>	<b>R717</b>	<b>R744</b>
--------------------------	-------------	--------------	-------------	-------------

<b>Kemisk formel</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>IUPAC Kemisk benämning</b>	Propan	Isobutan	Ammoniak	Koldioxid
<b>Molmassa [g/mol]</b>	44,1	58,1	17	44
<b>Kokpunkt [°C]</b>	-42,1	-11,6	-33,3	-78,4
<b>Kritisk temperatur [°C]</b>	96,7	135,9	132,4	31,1
<b>Kritiskt tryck [bar]</b>	42,4	36,8	113,5	73,8
<b>ODP</b>	0	0	0	0
<b>GWP</b>	3	3	0	1
<b>Säkerhetsklass</b>	A3	A3	B2	A1
<b>Nedre-och övre explosionsgräns [%]</b>	1,8--8,4%	1,8--8,4%	13,1--26,8%	0

I Tabell 3 ser man en del specialegenskaper av dessa fyra köldmedier. Ur tabellen ser man att koldioxid är det enda köldmediet som inte är explosivt, brännbart eller skadligt för människor. GWP värdet för alla dessa köldmedier är mellan tre och ett vilket är ett väldigt lågt värde och är därmed inte skadliga för klimatet. ODP värdet för alla köldmedier är 0. Kritiska trycket och temperaturen är lägst för koldioxid. Detta gör att koldioxid är det enda köldmedium av alla dessa fyra som fungerar endera vid ett sub-eller transkritiskt område. Köldmediernas kokpunkt är direkt beroende på kylprocessens drifttryck. Ur tabellen ser man att isobutanens kokpunkt ligger i atmosfärstryck vid -11,6 °C. Detta betyder att isobutan vid lägre förångnings temperaturnivåer (t.ex. -20°C) hamnar röra sig vid ett undertryck. Man strävar inte att röra sig i ett undertryck i en kylprocess p.g.a. att små läckage som kan förekomma i förångaren möjliggör fukt och luft att tränga in i processen. Köldmedier med en låg molekylvikt har i genomsnitt högt ångbildningsvärme vid förångning. Ur tabellen kan man se att ammoniak har en molekylvikt på 17g/mol som är lägst av alla dessa fyra köldmedier. När man jämför dessa köldmedier sinsemellan ser man att koldioxid har så gott som goda egenskaper vid alla åtta punkter i tabellen. Förutom den låga kritiska punkten för koldioxid är alla andra egenskaper goda hos köldmediet. Därmed är det förståeligt att koldioxid blivit det prefererade köldmediet inom kyltekniken (Calm, 1999).

## 10. Slutsats och diskussion

Uppgiften i detta examensarbete var att jämföra fyra köldmedier sinsemellan och framföra vilket av de fyra köldmedierna har de bästa egenskaperna. I en uppgift som lyder att jämföra köldmedier sinsemellan och hitta det bästa köldmediet, kan det kännas svårt att få ett konkret svar. Varför det är svårt att få ett konkret svar är på grund av att egenskaperna i ett köldmedium är så varierande. Valet av köldmedium är i hög grad beroende på vilken typ av kylprocess som man är intresserad av att installera för tillfället. Visserligen gör förordningar av både EU kommissionen och Montrealprotokollet det enklare att välja vilka köldmedier som får användas i en kylprocess. Tack vare förordningarna minimeras kategorierna av köldmedier till enbart en handfull och därmed är det delvis enklare att välja ett köldmedium till en viss kylprocess. Som nämnts i början av arbetet, är det alltid en form av kompromisslösning när man väljer ett köldmedium till en viss kylprocess. I fall man letar efter ett köldmedium med lågt ångbildningsvärme som t.ex. ammoniak, bör man också då vara medveten om att det finns bristfällighet i köldmediets andra egenskaper som t.ex. dess giftighet. Både propan och isobutan är ur teknisk synvinkel de bästa köldmedierna men deras största nackdel ligger i deras brand och explosionsrisk. Propan profilerar sig att vara det bästa då man enbart beaktar dess fysikaliska egenskaper. Jämförelsetabellen bestod av åtta väsentliga punkter som anses vara betydande när man jämför köldmedier sinsemellan. Av de åtta punkterna kan man delvis bestämma vilket köldmedium som är lämpligt för en viss kylprocess. Förutom de åtta punkterna finns det också en hel del andra faktorer som kan påverka valet av ett köldmedium. Bland annat påverkar priset på köldmedier och hur tillgängligt köldmediet är.

I examensarbetets allmänna del tog jag upp de olika processer som krävs för att skapa kyla med koldioxid. Även om det krävs ett mycket högt arbetstryck för att skapa kyla med koldioxid (jämfört med traditionella köldmedier) anser jag ändå att koldioxid är det mest lönsamma köldmedium nu och i framtiden inom kylteknik. Orsaken att jag anser detta, är på grund av att företag inom kylteknik för tillfället investerar både tid och pengar på att optimera och utveckla kylprocesser som använder sig av koldioxid som

köldmedium. Med dagens teknik och komponenter är det inte heller problem att röra sig i höga trycknivåer. En annan betydande faktor som jag också anser vara en stor fördel med koldioxid kylprocesser är att koldioxid inte har några kemiska belastningar. Tvärtom har koldioxid goda kemiska egenskaper så som t.ex. dess miljövänlighet och att det inte är en brandfarlig substans. Som tidigare nämnts i arbetet, är det viktigt att vi tänker på vilka skadliga ämnen vi släpper ut i atmosfären. Därmed känns det mest logiskt att vi strävar efter att använda oss av så miljövänliga köldmedier som möjligt även om detta kan betyda att man hamnar göra en del kompromisser i kylprocesser som t.ex. att röra sig i högre trycknivåer.

## KÄLLOR

- Aalto, E. o.a., 2012. *Kylmäteknikka*. 4. upplaga red. Helsingfors: Bookwell Oy.
- Ab, D. B., u.d. *KOLDIOXID-CO2*, Tyresö: [www.dafo.se](http://www.dafo.se).
- ASHRAE, 2009. Thermophysical properties of refrigerants. Atlanta: ASHRAE.
- Bodinus, W. S., 1999. *The Rise and Fall Of Carbon Dioxide Systems*, u.o.: ASHARE.
- Broberg, A., 2018. *Examensarbete angående CO2 som kylmedel* [Intervju] (31 januari 2018).
- Calm, J. M., 1999. ARTI REFRIGERANT DATABASE DATA SUMMARIES - VOLUME 1: SINGLE-COMPOUND REFRIGERANTS, Woodleaf Lane: AHRI.
- Cengel, Y. A. & Boles, M. A., 2011. *Thermodynamics An Engineering Approach*. 7. upplaga red. New York: McGraw-Hill.
- Danfoss, 2004. *Transcritical refrigeration systems using carbon dioxide (CO2)*, Nordborg: Danfoss.
- Danfoss, 2009. *Food Retail CO2 Refrigeration Systems*, u.o.: Danfoss RA Marketing.
- Danfoss, 2010. *Cascade HC/HFC-CO2 system How to control the system*, u.o.: Danfoss.
- Danfoss, 2010. *Transcritical CO2 booster system*, u.o.: Danfoss.
- Danfoss, 2011. *Heat reclaim in transcritical CO2 system*, u.o.: Danfoss.
- Danfoss, 2015. *Making the case for CO2 refrigeration in warm climates*, u.o.: Danfoss.
- Danfoss, 2018. *7 forces model*. [Online]  
Available at: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/refrigerants-from-a-danfoss-perspective/7-forces-model/>  
[Använd 13 April 2018].
- Dr Pearson, A., 2014. *CO2 as a refrigerant*. Paris: u.n.
- Finel, N. & Tommi, F., 2018. *Frågor angående Montreal Protokollet* [Intervju] (23 februari 2018).

Henry, S., 2012. *Lauhdelämmön Hyödyntäminen Kaupan Kylmäkoneistoista*. S:t Michel: Mikkelin Ammattikorkeakoulu.

Johnson, A., 2014. *RefrigerantHQ*. [Online]  
Available at: <https://refrigeranthq.com/montreal-protocol/>  
[Använd 1 Augusti 2014].

Kaappola, E., 2012. *2-asteiset CO<sub>2</sub>-kylmälaitokset*, u.o.: Suomen Kylmähdistys ry.

Kaappola, E., 2016. *Ammoniakki- ja CO<sub>2</sub>-teknologian kehitysnäkymiä*, Helsingfors: Suomen Kylmähdistys ry.

Kaappola, E., Aulis, H., Matti, J. & Jani, K., 2015. *Kylmätekniikan perusteet*. 4. Upplaga red. Helsingfors: Next Print Oy.

Kapanen, M., 2017. *Kylmäainetilanne 2017*, Helsingfors: Suomen Kylmähdistys ry.

Kleijn, D., u.d. *Thermodynamic cycle*, The Netherlands: Industrial Heat Pumps.

Laitos, I., 2017. *Ilmakehä-ABC*. [Online]  
Available at: [http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p\\_p\\_id=abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets\\_selectedInitial=I](http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p_p_id=abc_WAR_fmiwwwportlets&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&abc_WAR_fmiwwwportlets_selectedInitial=I)  
[Använd 6 november 2017].

Laitos, I., 2017. *Ilmakehä-ABC*. [Online]  
Available at: [http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p\\_p\\_id=abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&abc\\_WAR\\_fmiwwwportlets\\_selectedInitial=I](http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p_p_id=abc_WAR_fmiwwwportlets&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&abc_WAR_fmiwwwportlets_selectedInitial=I)  
[Använd 6 november 2017].

Lindroos, K., 2018. *Head of Technology Unit Huurre Group Oy* [Intervju] (2 Mars 2018).

Marketing, D. R., 2007. *CO<sub>2</sub> refrigerant for Industrial Refrigeration*, u.o.: Danfoss.

Miljöministeriet, 2017. *Så skyddas ozonskiktet*, Helsingfors: Finlands miljöcentral SYKE.

Polzot, A., D'Ágaro, P. & Cortella, G., 2016. *Energy analysis of a transcritical CO2 supermarket refrigeration*, Turin: University of Udine (DPIA).

Prapainop, R. & Suen, K. O., 2012. Effects of refrigerant properties on refrigerant performance comparison: A review. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(4), s. 486-493.

Rohrer, C., 2006. *Transcritical CO2 Bottle Cooler Development*, Bridgeton: u.n.

Räisänen, J., 2018. *Adjunct professor in meteorology, University of Helsinki* [Intervju] (22 Mars 2018).

Sawalha, S., 2012. *Investigation of heat recovery in CO2 trans-critical solution in supermarket refrigeration*, Stockholm: The Royal Institute of Technology (KTH).

Sawalha, S. & Chen, Y., 2010. *Investigations of Heat Recovery in Different Refrigeration System Solution in Supermarkets*, Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH).

SPL, 2013. *Allt om Vetenskap*. [Online]

Available at: <http://www.alltomvetenskap.se/nyheter/ozonhalet-varmer-upp-afrika?page=10>

[Använd 2013].

SWEP, u.d. *SWEP Company*. [Online]

Available at: <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/appendix/appendix-b/>

[Använd 18 April 2018].

tidning, E. u. o., 2009. *EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING (EG) nr 1005/2009*, u.o.: Europeiska unionen.

tidning, E. u. o., 2014. *EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING (EU) nr 517/2014*, u.o.: Europeiska unionen.

UNEP, 2016. *Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. 10. upplaga red. Nairobi: UNEP.



vetenskap, A. o., 2007. *Allt om vetenskap*. [Online]

Available at: <http://www.alltomvetenskap.se/nyheter/vad-ar-trippelpunkt>

[Använd 6 April 2018].

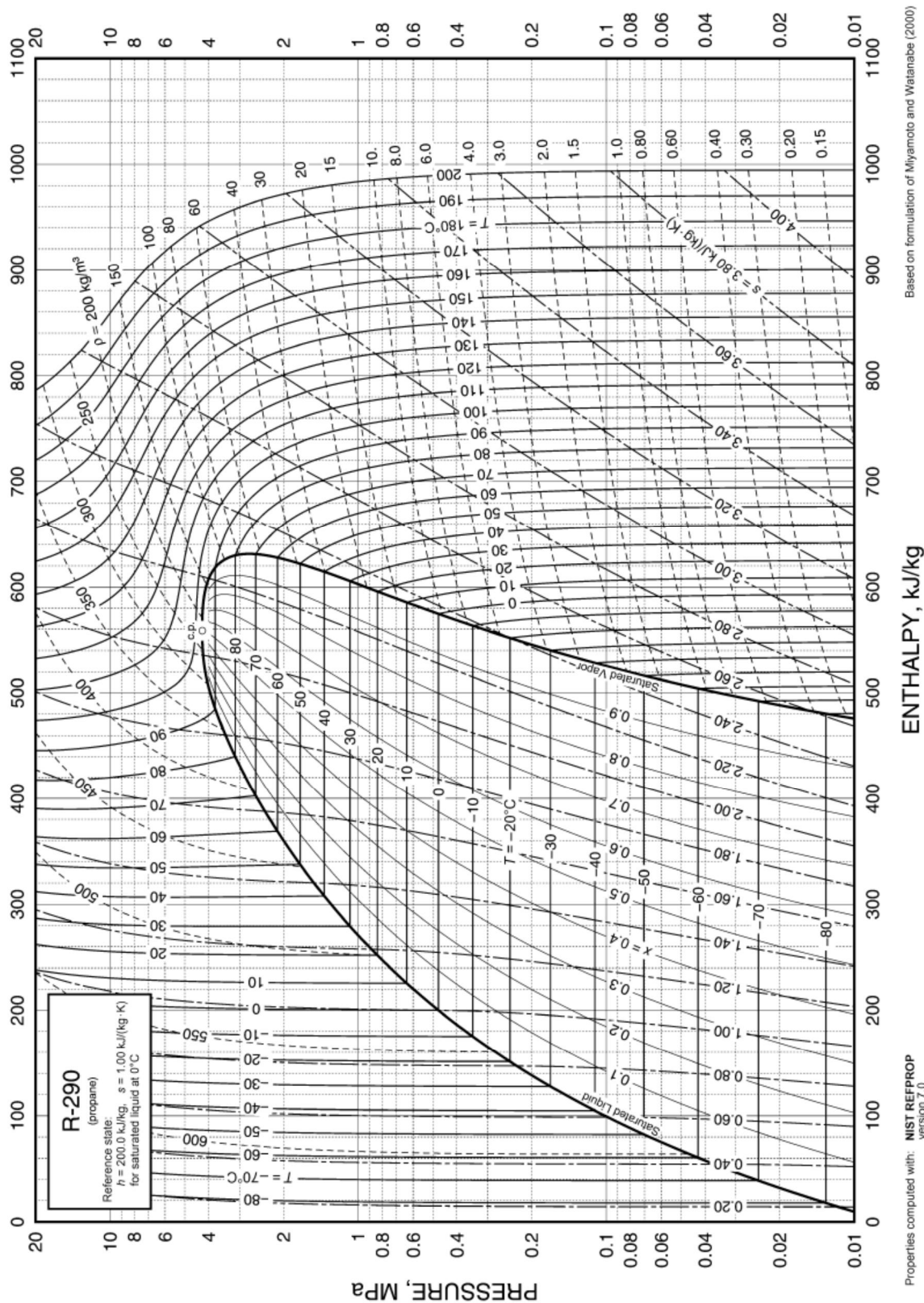
Ympäristökeskus, S., 2015. *Valvontaohje otsonikerrosta heikentäviä aineita tai fluorattuja kasvihuonekaasuja sisältävien laitteiden huoltoa valvoville viranomaisille*, Helsingfors: Finlands miljöcentral.

Åkermarck, A., 2018. *Kylprocess*. Helsingfors: u.n.

Åkermarck, A., 2018. *Tabell på koldioxid halt*. Helsingfors: u.n.

# BILAGOR

Bilaga 1. Log  $p$ ,  $h$ -diagram för R290 (ASHRAE, 2009)



Bilaga 2. Log p, h-diagram för R600a (ASHRAE, 2009)

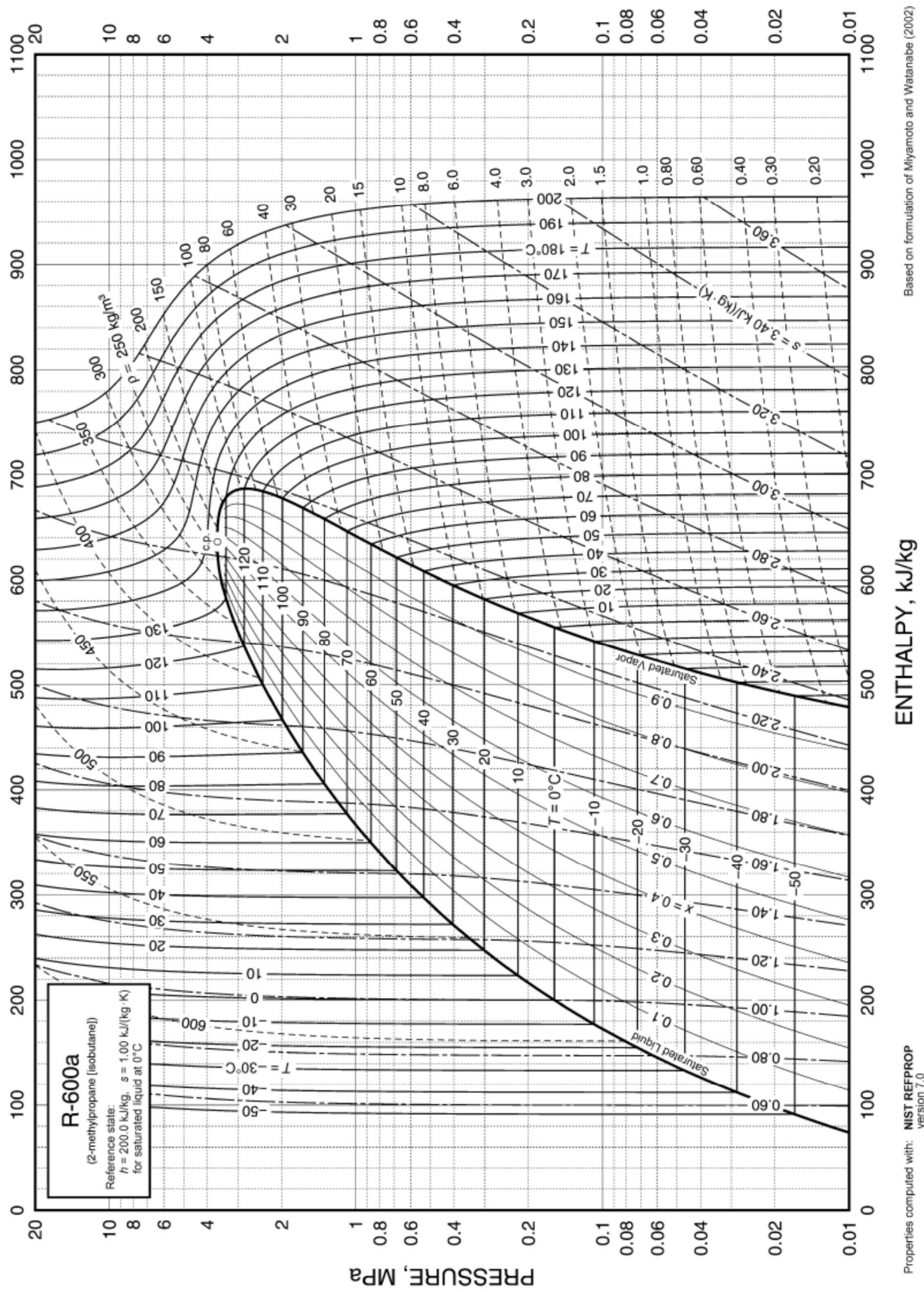
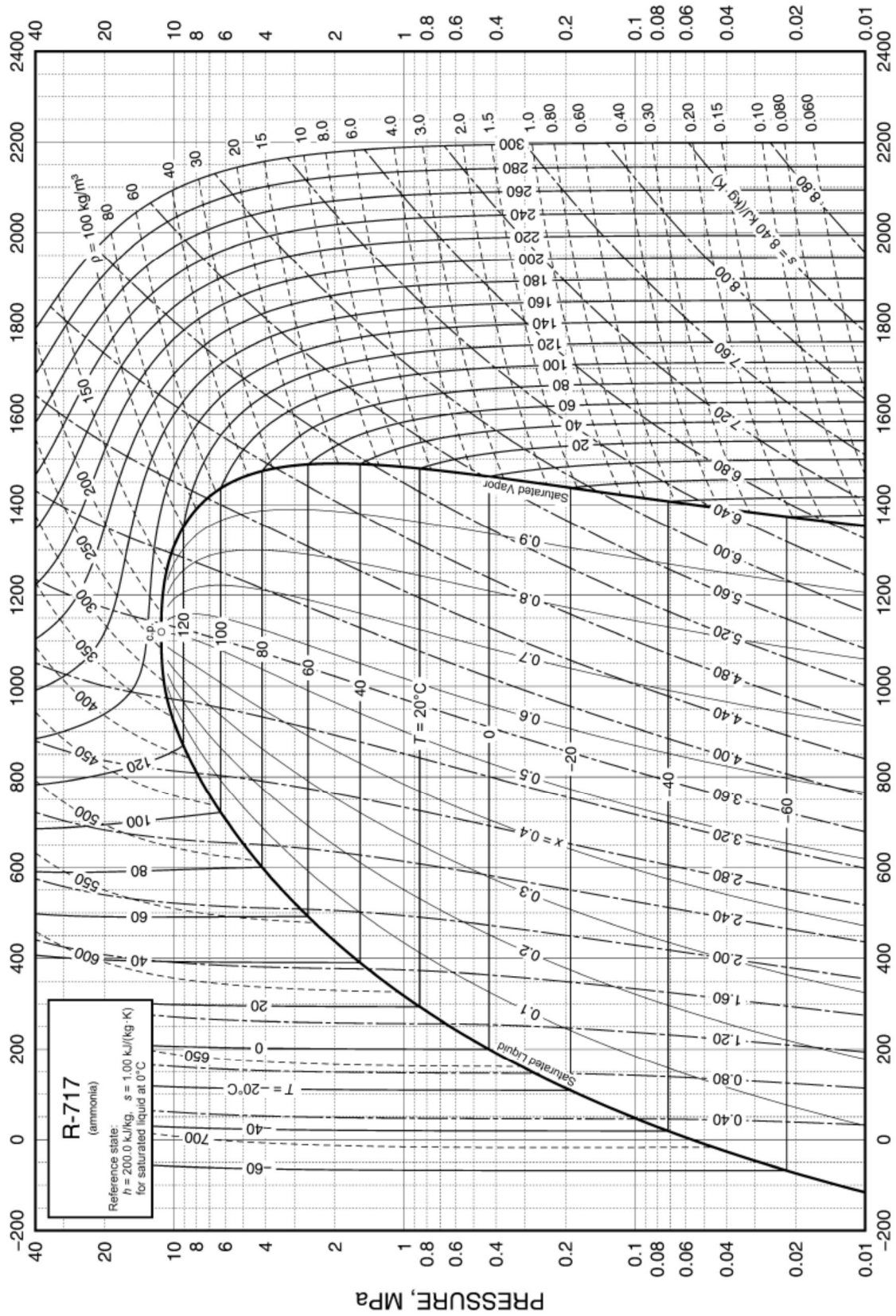


Fig. 23 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 600a (Isobutane)



Bilaga 3. Log p, h-diagram för R717 (ASHRAE, 2009)



Based on formulation of Tillner-Roth et al. (1993)

Fig. 16 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 717 (Ammonia)

Bilaga 4. Log p, h-diagram för R744 (ASHRAE, 2009)

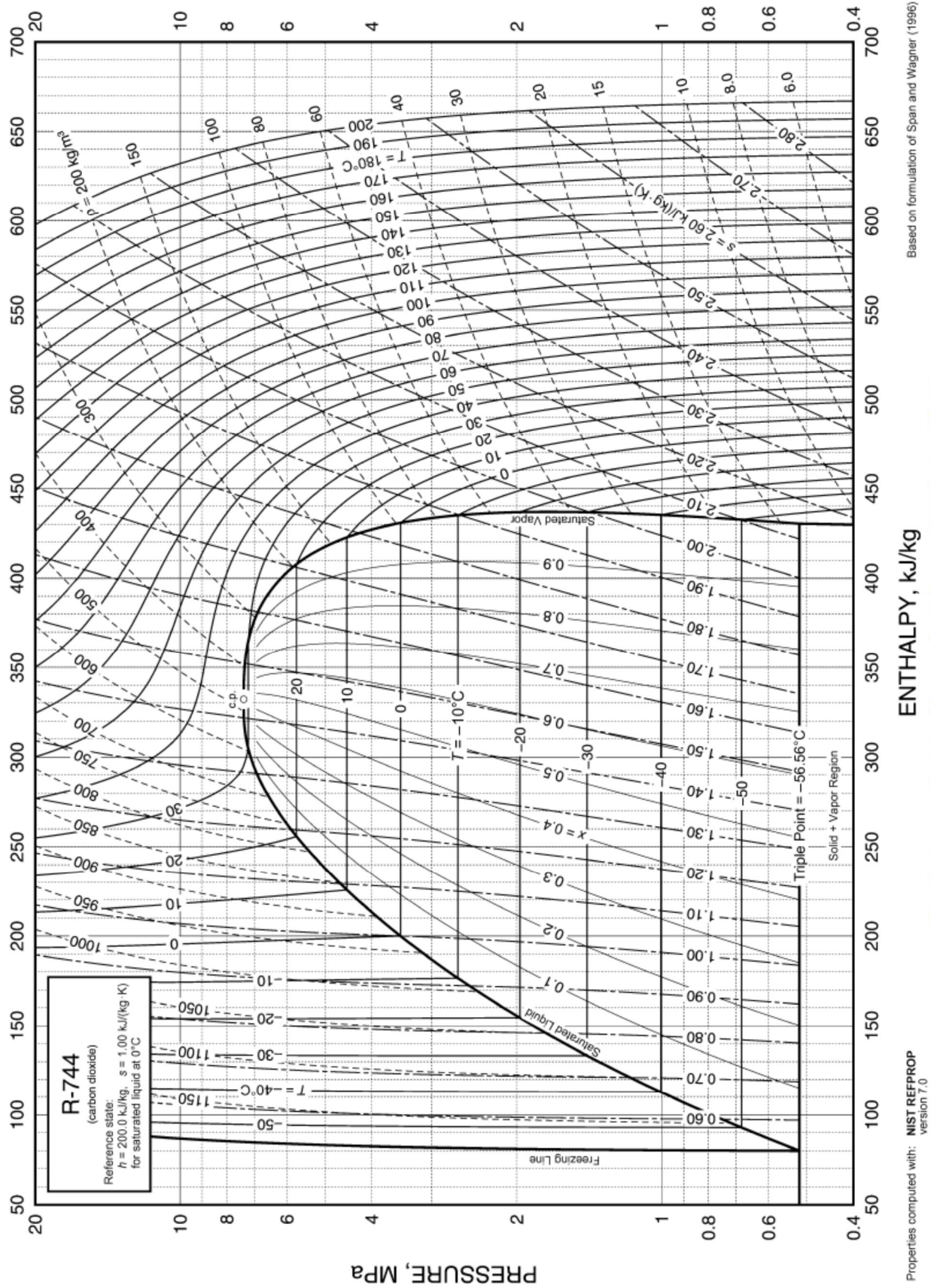


Fig. 18 Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 744 (Carbon Dioxide)

